

ВІДЗИВ

офіційного опонента на дисертаційну роботу
Нестерова Олександра Володимировича

«Трикластерна мікроскопічна модель опису властивостей легких атомних ядер»,

подану на здобуття наукового ступеня доктора фіз.-мат. наук за спеціальністю
01.04.02 – “теоретична фізика”

Дослідження властивостей дискретних та резонансних станів легких ядер, а також ядерних реакцій з такими ядрами є однією з актуальних задач сучасної ядерної фізики. Зокрема, ці дослідження стимульовані аналізом астрофізичних ланок з розповсюдження легких ядер у Всесвіті та новітніми дослідженнями реакцій синтезу на легких ядрах. В таких ситуаціях необхідно знати перерізи ядерних реакцій в області низьких енергій порядку декількох кіловольт у вхідних каналах реакцій з зарядженими частинками. Кулонівський бар'єр сильно зменшує ймовірність їх взаємодій, що приводить до великих труднощів при реєстрації перерізів відповідних реакцій, і теоретичні методи є ефективним та часто найбільш надійним інструментом визначення перерізів.

Велика кількість легких ядер є слабкозв'язаними системами з чіткою кластерною структурою. Вони можуть легко змінювати свої розміри та форму (тобто поляризуватися) при взаємодії з іншими ядрами. Поява нейтронів на периферії ядер може суттєво зменшити вплив кулонівської взаємодії у порівнянні з ядерною і, тим самим, збільшити перерізи взаємодії легких ядер. Для достовірного теоретичного аналізу таких ефектів необхідно вміти коректно врахувати кластерну структуру та поляризованість ядер і кластерів

До недавнього часу в теоретичній ядерній фізиці інтенсивно розроблялися двокластерні підходи, в межах яких можливо досліджувати частину енергетичного спектру дискретних станів легких ядер та ядерні реакції з бінарними каналами. Разом з цим, в багатьох легких ядрах проявляється трикластерна структура їх енергетичного спектру, а також вихідні канали ядерних реакцій є трикластерними. Все це вказує на актуальність розробки та

аналізу теоретичних підходів, що враховують утворення трьох кластерів у ядерних системах. Такі дослідження надзвичайно складні, так як необхідно коректно враховувати не тільки кінематичні кореляції в русі нуклонів (зокрема, ті, що обумовлені збереженням руху центра мас, кутового моменту та врахуванням принципу Паулі), але і великі ймовірності розпаду ядер. Любі ж спроби застосування наближених методів попередньо вимагають глибокого теоретичного аналізу на основі фундаментальних фізичних принципів та математично надійних методів.

Саме такий підхід запропоновано в роботі Нестерова О. В. Цей підхід розвинуто в рамках алгебраїчної версії методу резонуючих груп (АВ МРГ), яка є одним з найпопулярніших інструментів дослідження властивостей легких атомних ядер та перебігу ядерних реакцій з їх участю. Але до останнього часу її застосовність була обмежена двокластерними задачами. Трикластерна ж версія АВ МРГ, яка представлена в дисертації, значно розширює коло можливостей розв'язання сучасних актуальних задач фізики легких атомних ядер.

Дисертація складається з вступу, шести розділів та висновків. Основним змістом **вступу** є перелік ядерно-фізичних задач, що були розв'язані при виконанні дисертаційної роботи та обґрунтуванню їх актуальності.

В **першому розділі** представлено основні положення запропонованого автором підходу до розв'язання трикластерних задач фізики легких атомних ядер. Зокрема показано, як здійснюється перехід до системи алгебраїчних рівнянь, яка є наслідком розкладу хвильової функції рівняння Шредингера по базису антисиметризованих багаточастинкових функцій, де хвильові функції кластерів є оболочковими, а функція відносного руху розкладається по функціям шестивимірного гармонічного осцилятора. Обговорюється техніка побудови всіх необхідних матричних елементів для запису відповідної системи рівнянь, що базується на методі твірних функцій та твірних матричних елементів, а також обговорюються деталі застосування методу до дослідження трикластерної структури зв'язаних станів та станів неперервного спектру трикластерного континууму.

В другому розділі, в основному, представлені результати дослідження кластерної структури та нейтронного гало в ядрах ${}^6\text{He}$, ${}^8\text{He}$, ${}^6\text{Li}$, ${}^9\text{Be}$, ${}^{10}\text{B}$. Це питання має важливе значення при дослідженнях реакцій повного та неповного злиття атомних ядер в процесах нуклеосинтезу, основною перешкодою для перебігу якого є кулонівський бар'єр. Наявність кластерної структури та нейтронного гало може значно зменшити радіус ефективного кулонівського бар'єру у порівнянні з радіусом ядерної взаємодії і, тим самим, збільшити ймовірність злиття ядер. В дисертації була продемонстрована сильна кластеризація ядер ${}^6\text{Li}$, ${}^6\text{He}$, ${}^8\text{He}$, а також наявність у вищезгаданих ізотопів гелію великого нейтронного гало. Було показано, що, незважаючи на квантову динаміку руху нуклонів, усереднену форму досліджуваних ядер можна наближено інтерпретувати як форму деяких просторових геометричних об'єктів, тобто описувати, деякою мірою, аналогічно просторовим структурам у твердих тілах. Наприклад, було показано, що усередненою формою ядра ${}^6\text{He}$ є рівнобедрений трикутник з гострими кутами з α -частинкою у вершині, а ядро ${}^9\text{Be}$ у основному стані можна розглядати як рівнобедрений трикутник з тупими кутами з нейтроном при вершині з висотою рівною ~ 2 Фм і з основою ~ 5 Фм.

Важливими, як мені здається, є і результати дослідження спектру ядра ${}^{10}\text{B}$, в яких продемонстровано, що дискретний стан у цьому ядрі утворюється тільки при врахуванні спіно-орбітальної взаємодії; тим самим був продемонстрований значний вплив спіно-орбітальних сил на формування спектрів легких атомних ядер.

У третьому розділі розглянуті результати, що отримані з аналізу трикластерного розсіяння при вивченні станів неперервного спектру, які лежать в трикластерному континуумі ядер ${}^6\text{He}$, ${}^6\text{B}$, ${}^5\text{H}$, ${}^9\text{Be}$, ${}^9\text{B}$. Передбачено існування резонансних станів, які до цього часу ще експериментально не спостерігалися. Детальніше обговорюються їх характеристики та невизначеності обумовлені використанням різних методів обчислень та взаємодій. Показано, що ефективний електричний заряд кулонівської взаємодії у трикластерних

каналах, а тим самим і кулонівський бар'єр, може бути значно меншим ніж у двокластерних каналах.

У четвертому розділі розглядається вдосконалення підходу, сформульованому у першому розділі, на врахування вихідних трикластерних каналів реакцій при вхідних бінарних. Це дозволило розглянути перебіг таких реакцій термоядерного синтезу тритія, як ${}^3\text{H}({}^3\text{H}, 2\text{n}){}^4\text{He}$ і ${}^3\text{He}({}^3\text{He}, 2\text{p}){}^4\text{He}$. Остання з них є важливою з точки зору астрофізики, як один з базових ланцюжків pp-циклу ядерних реакцій, що відбуваються на Сонці. Виконане в дисертаційній роботі дослідження перерізу цієї реакції при малих енергіях ($E < 15$ кеВ), які недосяжні для сучасного експерименту, не виявило резонансних станів. При більших енергіях значення астрофізичного S -фактора реакції в межах похибок, в цілому, узгоджуються з експериментальними даними.

У п'ятому розділі представлені результати, отримані у варіанті трикластерної моделі, який дозволяє враховувати поляризацію бінарних підсистем при розгляді станів дискретного спектру легких атомних ядер та ядерних реакцій з двочастинковими вхідними та вихідними каналами. В такому підході досліджено стани дискретного та неперервного спектрів ядра ${}^7\text{Li}$, перебіг реакції ${}^6\text{Li}(\text{n}, {}^3\text{H}){}^4\text{He}$, а також реакцій радіаційного поглинання ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$, ${}^3\text{H}(\alpha, \gamma){}^7\text{Li}$, ${}^6\text{Li}(\text{p}, \gamma){}^7\text{Be}$ і ${}^6\text{Li}(\text{n}, \gamma){}^7\text{Li}$. З фізичної точки зору найбільш цікавим тут є дослідження реакцій радіаційного поглинання, які відіграють важливу роль у розповсюдженні ізотопів з $A=7$ у Всесвіті. Продемонстрована важливість врахування поляризації бінарних підсистем, які мають так звану "м'яку" кластерну моду руху, при розрахунках значень астрофізичних S - факторів реакцій. Зокрема, показано, що при нульовій енергії врахування поляризації в реакції ${}^3\text{H}(\alpha, \gamma){}^7\text{Li}$ приводить до збільшення значення астрофізичного S - фактору для цієї реакції у 1,8 разів, а для реакції ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$ - у три рази.

В шостому розділі продемонстровані результати досліджень можливості існування дискретних та резонансних станів у цуклошій системи, яка

складається з чотирьох нейтронів, тобто у тетранейтроні. Виконані автором обчислення показали, що зв'язаного стану тетранейтрона не існує, але є можливість існування резонансного стану тетранейтрона, що було недавно підтверджено експериментально.

В заключній частині дисертації сформульовані висновки та основні результати досліджень.

В цілому докторська дисертація О. В. Нестерова є актуальною і завершеною науково-дослідницькою роботою, яка містить фундаментальні теоретичні досягнення з визначення ролі та розробки методів опису кластерних структур в легких ядрах. Основні результати дисертації є новими, достовірними і мікроскопічно обґрунтованими. Їх достовірність базується на використанні адекватного математичного формалізму та сучасних методах числових розрахунків і, в ситуаціях там де це можливо, підкріплюється узгодженням як з експериментальними даними, так і з теоретичними результатами інших авторів.

З матеріалів представлених в дисертації видно, що О.В. Нестеров є висококваліфікованим науковцем, який вільно та досконало володіє сучасними аналітичними та числовими методами теоретичної фізики та програмування.

Разом з цим слід зробити такі зауваження.

1. Надійність отриманих в дисертації результатів та переваги розробленої автором моделі часто демонструються порівняннями з результатами інших авторів, які розглядали схожі задачі. На мою думку, для того, щоб більш точно порівняти свою модель з іншими та підкреслити її особливості, слід було б представити деякий огляд підходів, які використовуються на даний час для дослідження станів неперервного спектру в кластерних моделях легких атомних ядер.

2. Наприкінці п'ятого розділу автор розглядав зв'язок між значеннями астрофізичних S -факторів при нульовому значенні енергії для реакцій радіаційного поглинання ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$, ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Li}$, ${}^6\text{Li}(p, \gamma){}^7\text{Be}$ и ${}^6\text{Li}(n, \gamma){}^7\text{Li}$ та параметрами основних станів відповідних кінцевих ядер. Отримані результати є

цікавими, але, на мою думку, дисертант тут не приділив достатньої уваги фізичному поясненню закономірностей, які при цьому можуть виникати.

3. Для опису взаємодії між нуклонами в роботі використовується декілька двочастинкових потенціалів різних авторів. Було б корисним відмітити їх розбіжності та кількість параметрів від яких вони залежать, а також проаналізувати можливість використання єдиного потенціалу, який можна було б вважати найбільш універсальним і надійним при дослідженні властивостей легких ядер та ядерних реакцій між ними.

Текст дисертації достатньо гарно оформлений та відповідає вимогам МОН України до текстів дисертацій, хоча іноді зустрічаються нестандартні терміни та описки. Зокрема, для значень енергії в кілоелектровольтах в дисертації використовується скорочення "KeV" з великою літерою "K", однак, згідно стандартам позначень, літера "к" повинна бути малою.

Але ці зауваження не знижують загальної дуже високої оцінки результатів, що отримані в дисертації О. В. Нестрова. Основні положення і висновки дисертації повно і вчасно викладені в 54 наукових працях здобувача (з них 25 опубліковані в фахових наукових видавцях). Результати роботи пройшли багаторазову апробацію на міжнародних і вітчизняних наукових конференціях та семінарах і добре відомі спеціалістам як в Україні, так і за її межами. Зокрема, високий міжнародний рівень досліджень та їх достовірність підтверджується публікаціями автора у провідних міжнародних наукових журналах (наприклад, Phys.Rev.C) та перевіркою і використанням багатьох його результатів іншими авторами (>130 цитувань згідно міжнародної наукової бази даних Scopus).

Положення і висновки, що отримані у дисертації, розроблений метод дослідження квантових малонуклонних систем доцільно рекомендувати для використання у науковій роботі, а також в курсах лекцій з ядерної фізики і теорії багаточастинкових систем у науково-учбових закладах (наприклад, Інституті ядерних досліджень ІАНУ; Київському національному університеті

імені Тараса Шевченка; Харківському національному університету імені В.Н. Каразіна, тощо).

Автореферат повністю відповідає змісту дисертаційної роботи.

Вважаю, що дисертаційна робота "Трикластерна мікроскопічна модель опису властивостей легких атомних ядер" є закінченою науково-дослідною роботою, яка містить новий сучасний аналіз властивостей легких ядер та ядерних реакцій з ними. За актуальністю, обсягом проведених досліджень, рівнем і кількістю публікацій та новизною отриманих результатів дисертація задовольняє всім вимогам МОН України щодо докторських дисертацій, а її автор, Нестеров Олександр Володимирович, безумовно, заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук зі спеціальності 01.04.02 - теоретична фізика.

Проф., доктор фіз.-мат. наук,
професор кафедри ядерної фізики
Київського національного університету
імені Тараса Шевченка



В.А. Плюйко

Підпис засвічаю
Вчений секретар
КАРАУЛЬНА Н.В.
15.05.201

