

Відгук
офіційного опонента О.Я.Дзюблика на дисертацію
Нестерова Олександра Володимировича
“Трьохкластерна мікроскопічна модель опису
властивостей легких атомних ядер”,
представлену на здобуття наукового ступеню доктора фіз.-мат. наук
за спеціальністю 01.04.02 - теоретична фізика

Ідея про те, що ядра можна розглядати як систему взаємодіючих кластерів (пуклонних асоціацій) виникла дуже давно. Найбільш відомим кластером є α -частинка, яка характеризується великою енергією зв'язку в перерахунку на один нуклон. Тому такі ядра, як ${}^8\text{B}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{16}\text{O}$, трактувались як молекули, утворені безструктурними α -частинками. Врахування їхньої структури, принципу Паулі та реальної міжнуклонної взаємодії, звичайно, дуже ускладнює задачу.

Дисертація О.В.Нестерова як раз і присвячена проблемі побудови мікроскопічної теорії легких ядер, як системи трьох кластерів, та вивчення реакцій за їхньою участю. Зокрема, розглядаються такі ядра, як ${}^5\text{H} = {}^4\text{H} + n$ і ${}^6\text{He} = \alpha + n$, тощо. В основі розрахунків Нестерова лежить алгебраїчна версія методу резонуючих груп (АВ МРГ), запропонована свого часу Г.Ф.Філіпповим. В рамках цього методу хвильова функція всього ядра розкладається по базисним функціям, які є добутками хвильових функцій, які описують внутрішній рух кластерів, а коефіцієнти такого розкладу є функціям координат відносного руху кластерів. В дисертації відносний рух трьох кластерів задається двома векторами Якобі q_1 , q_2 . В загальному випадку пряомолінійне застосування МРГ пов'язане з необхідністю розв'язувати складні інтегро-диференціальні рівняння. Однак в алгебраїчній версії МРГ коефіцієнти розкладу, як функції q_1 , q_2 , розкладаються в ряд по осциляторним функціям і задача зводиться до розв'язання стандартних алгебраїчних рівнянь на власні значення і власні вектори (коефіцієнти розкладу). Більше того, процеси розсіяння трьох кластерів та реакцій за їхньою участю також описуються із застосуванням осциляторного базису. Точніше, робиться дуже нестандартна для теорії розсіяння процедура заміни падаючих плоских хвиль, нормованих на δ -функцію, на деяку комбінацію квадратично-інтегрованих осциляторних функцій, що також спрощує числові обчислення. На наш погляд, в дисертації варто було б пояснити яким чином комбінації обмежених у просторі осциляторних функцій задовольняють граничним умовам на нескінченності у вигляді суми плоско падаючої хвилі та сферичної розбіжної хвилі.

Актуальність робіт, представлених в дисертації, полягає в тому, що в останні роки на провідних прискорювачах світу проводилось чимало експериментів з реакціями нейтронно-надлишкових легких ядер. Таки реакції відбуваються і в зірках при високих температурах. Вони можуть бути дуже корисними і при реалізації керованого термоядерного синтезу в земних умовах. Нарешті, вивчення процесів в легких ядрах дає змогу

краще зрозуміти природу ядерних сил. Тому поява високоякісної мікроскопічної теорії Нестерова є дуже своєчасною і корисною.

В першій главі детально описані дуже нестандартні методи мікроскопічних розрахунків в рамках АВ МРГ. Описані три типу осциляторного базису, що використовуються в дисертації, та їх теоретико-групова класифікація. Якщо раніш В.С.Василевським та іншими розглядалися системи з двох кластерів, то дисертант вивчив більш складну систему з трьох кластерів. При виборі осциляторного базису їхній відносний рух вже описується не трьохвимірним, а шестивимірним осцилятором. Такому осцилятору відповідає група унітарних перетворень у 6-вимірному просторі $U(6)$ та декілька варіантів підгруп. В дисертації в основному використовуються два варіанти. А саме, біосциляторний базис, в якому рух вздовж векторів q_1, q_2 описується двома незалежними осциляторними функціями з квантовими числами n_1, l_1 та n_2, l_2 . І по друге, гіперсферичний базис, в якому хвильові функції утворюють базис незвідних представлень групи $O(6)$ і характеризуються таким квантовим числом як гіпермомент K , який приймає значення $K = l_1 + l_2, l_1 + l_2 - 2, \dots$

З іншого боку, в зв'язку з тим, що розглянуті 3-кластерні системи мають сферичну симетрію, то здавалось би, для описання їх зв'язаних станів варто вводити замість q_1, q_2 такі колективні координати, як три кути Ейлера, що визначають орієнтацію головних осей тензора інерції ядра, глобальний радіус ρ та ще два незалежних кути. Такі координати вводились для 3-частинкових систем вже давно в роботах А.Драхта і Філіппова. Їхнє узагальнення на випадок систем з довільним числом частинок було дано Зикендратом, Дзюбликом та Філіпповим. Зазначимо також, що ці змінні успішно використовувались мною при описанні колиально-обертальних спектрів 3-атомних молекул.

Далі в цій же главі описано також методику обчислення матричних елементів для міжнуклонної взаємодії та оператора кінетичної енергії на осциляторних функціях із застосуванням твірних функцій в просторі Баргманна. Ця елегантна техніка дає змогу значно спростити обчислення. Ядерна міжнуклонна взаємодія вибирається Нестеровим у вигляді парного потенціалу, який апроксимується гаусівською функцією. При цьому матричні елементи на осциляторних функціях вдається порахувати аналітично.

В другій главі вивчаються зв'язані стани таких трьохкластерних ядер, як ${}^6\text{He}$, ${}^6\text{Li}$, ${}^8\text{He}$, ${}^{10}\text{B}$ та ${}^9\text{Be}$. Особливий інтерес в цьому ряду представляють ядра ${}^6\text{He}$ і ${}^8\text{He}$ з надлишком нейтронів. Їхнє вивчення дає важливу інформацію про нейтронне гало (нейтронну шкіру), що оточує більш компактний кор, утворений решіткою нуклонів. Цікаво також представлене порівняння властивостей ізотопів ${}^6\text{He}$ та ${}^6\text{Li}$, яке дає змогу краще зрозуміти роль кулонівської взаємодії в легких ядрах. Використовуються потенціали Волкова і Мінесоти. При цьому береться лише один вільний параметр – осциляторний радіус b , який застосовується при підгонці енергії зв'язку α -частинки. Залишається незрозумілим чому параметр b для осциляторного базису відносного руху кластерів вибирається для узгодження з даними по

енергії зв'язку одного з них. Кулонівську взаємодію Нестеров бере до уваги лише в ${}^6\text{Ti}$, де вона найбільш суттєва. В доволі складних розрахунках він спромігся ще й врахувати принцип Паулі, котрим можна знехтувати лише в асимптотичній області при великій відстані між кластерами. Що стосується нуклонів всередині кластерів, то для них принцип Паулі виконується автоматично за рахунок вибору внутрішніх хвильових функцій у вигляді детермінанта Слетера.

Порашовані в дисертації енергії зв'язку ядер гарно узгоджуються з експериментом. Представлені кореляційні функції для α -частинки і двох нейтронів в ядрі ${}^6\text{He}$ явно показують форму ядра і розподіл густини його нуклонів. Розраховані середньо-квадратичні радіуси розподілу протонів в ${}^6\text{He}$ та ${}^8\text{He}$ повністю узгоджуються з експериментальними даними, а для нейтронів дещо перевищують їх. Причому показано, що нейтронний радіус значно перевищує протонний, що свідчить про існування нейтронного гало в цих ізотопах. Крім того, Нестеров розрахував також радіальну залежність розподілів нейтронів, протонів і всіх нуклонів в ${}^6\text{He}$ та ${}^8\text{He}$, яка чудово узгоджується з експериментом і представлена на рис. 2.8 і 2.9. В дисертації знайдено, що густина нейтронів всередині ${}^8\text{He}$ трішки спадає, що також свідчить, що валентні нейтрони за рахунок принципу Паулі виштовхуються від кору ядра.

Порашовано також форма трикутників, утворених кластерами α , α та d , які складають ядро ${}^{10}\text{B}$, та усереднені довжини їхніх ребер, для зв'язаних станів 1^+ , 2^+ , або 3^- , котрим відповідає значення ізоспіну $T=0$.

На відміну від робіт, в яких для пояснення компактної структури ${}^{10}\text{B}$, автори крім парних сил вводили ще й трьохчастинкові сили, дисертант одержав добре узгодження з експериментом за рахунок лише парних сил з врахуванням спін-орбітальної взаємодії.

Третя глава присвячена аналізу резонансних станів ядер ${}^6\text{He}$, ${}^6\text{Li}$, ${}^8\text{He}$, ${}^{10}\text{B}$ та ${}^8\text{Be}$ в трьохкластерному континуумі. В цьому випадку усунення з ядра одного кластера на велику відстань призводить до розвалу і ядерного залишку на два кластера. В рамках АВ МРГ в дисертації рахуються енергії та ширини резонансних рівнів, які викликають появу відповідних піків в перерізах розсіяння з участю перелічених вище ядер. Все це робиться із застосуванням власних фаз розсіяння, тобто з представлення де S матриця набуває діагональний вид. Розраховані резонансні параметри для ядер ${}^6\text{He}$, ${}^6\text{Li}$, ${}^8\text{He}$ непогано узгоджуються з експериментом.

В четвертій главі представлені результати розрахунків перерізів для реакцій термоядерного синтезу ${}^3\text{H}+{}^3\text{H}\rightarrow 2n+{}^4\text{He}$ і ${}^3\text{He}+{}^3\text{He}\rightarrow 2p+{}^4\text{He}$. Ці реакції трактуються як перетворення двох кластерів у вхідному каналі в три кластера у кінцевому. Відповідно, початкові кластери описуються сферичними координатами. Найбільш цікавим є застосування цих розрахунків до процесів, які відбуваються в зірках, де всі ядерні реакції протікають в плазмі. При цьому електричне екранування може суттєво звужувати кулонівський бар'єр і тим самим прискорювати темп ядерної реакції, який вже характеризується S-фактором реакції, який визначається не тільки перерізом, але й експонентой з параметром Зоммерфельда.

Розраховані в дисертації S-фактори для вказаних вище реакцій гарно узгоджуються з доступними експериментальними даними.

П'ята глава містить інформацію о поляризації трьохкластерних ядер при їх зіткненнях. Справа в тому, що кластери в легких ядрах зв'язані слабо. Тому при зіткненнях вони змінюють форму і розміри, що впливає на положення рівнів ядер і перерізи реакцій. Нестеров розглянув вплив поляризації кластерів на зв'язані та віртуальні рівні ядра ${}^7\text{Li}$ і переріз реакції ${}^6\text{Li}+n\rightarrow{}^3\text{He}+{}^4\text{He}$. Ядро ${}^7\text{Li}$ описувалось як три кластери ${}^4\text{He}+d+n$. З таблиці 5.1 видно, що врахування поляризації кластерів покращує узгодження розрахунків енергії зв'язку ${}^7\text{Li}$ з експериментом. З таблиці 5.2 видно також, що врахування поляризації дало змогу дисертанту отримати блискуче співпадіння з даними по резонансам в ${}^7\text{Li}$.

В останній главі піднімається питання про існування тетранейтрона, яке на протязі десятиліть є викликом для теоретиків. Зв'язаного стану системи чотирьох нейтронів дисертант не одержав, але при застосуванні потенціалу Волкова він знайшов, що в тетранейтроні має бути резонанс при енергії 2 – 3 MeV з шириною від 2 до 7 MeV.

Дисертація О.В.Нестерова вносить вагомий вклад в науку і суттєво розширює наші знання про процеси, що відбуваються в легких ядрах. Виконана велетенська і я би сказав ювелірна робота, пов'язана як з аналітичними, так і числовими розрахунками. Достатньо сказати, що дисертанту довелось брати осциляторний базис, який складався з тисяч осциляторних функцій. Дуже приємно, що всякий раз розрахунки доводились до порівняння з експериментом. В деяких випадках дисертант передбачив існування фізичних ефектів таких як існування резонансу в тетранейтроні.

Результати дисертації можуть, в принципі, мати практичне значення при виборі оптимального режиму паработки тритієвих мішеней та оптимізації роботи термоядерних реакторів, або холодного синтезу.

Матеріали дисертації опубліковані в престижних журналах і доповідались на численних конференціях. Як об'єм дисертації, так і якість та кількість результатів, представлених в ній, значно перевищують середній рівень вимог ВАК України до дисертацій, що представляються на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук.

Отже, О.В.Нестеров безумовно заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук.

Доктор фіз.-мат. наук
провідний науковий
співробітник ІЯД НАНУ

О.Я.Дзюблик

Підпис О.Я.Дзюблика засвідчую:

Заступник директора
ІЯД НАНУ



Л.І.Войтер