

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧНОЇ ФІЗИКИ ІМ. М. М. БОГОЛЮБОВА

П'ятницький Дмитро Валерійович

УДК 539.172

**ВАРІАЦІЙНІ РОЗРАХУНКИ СТРУКТУРНИХ
ОСОБЛИВОСТЕЙ МАЛОНУКЛОННИХ ЯДЕР**

Спеціальність 01.04.02 – теоретична фізика

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Інституті теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України.

Науковий керівник:

доктор фізико-математичних наук, професор

Сименюг Іван Васильович,

Інститут теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України, завідувач відділу прикладних проблем теоретичної фізики

Офіційні опоненти:

доктор фізико-математичних наук, професор

Плюйко Володимир Андрійович,

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, фізичний факультет, професор кафедри ядерної фізики

кандидат фізико-математичних наук, **Вербицький Володимир Петрович,**

Інститут ядерних досліджень НАН України, старший науковий співробітник відділу ядерних реакцій

Захист відбудеться « 27 » лютого 2013 р. о 10.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.191.01 Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова Національної Академії Наук України за адресою: вул. Метрологічна 14-б, м. Київ, 03680, Україна.

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова Національної Академії Наук України за адресою: вул. Метрологічна 14-б, м. Київ, 03680, Україна.

Автореферат розісланий « 25 » січня 2013 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради Д 26.191.01,

доктор фіз.-мат. наук

В. Є. Кузьмичев

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Однією з невирішених проблем в ядерній фізиці є побудова потенціалів взаємодії між нуклонами, які б могли одночасно описувати експериментальні дані для систем двох, трьох та чотирьох нуклонів. Насамперед це стосується енергій зв'язку та середньоквадратичних розмірів даних систем. Існує велика кількість різних потенціалів нуклон-нуклонної взаємодії, особливо так званих реалістичних ядерних потенціалів, які надійно описують експериментальні дані лише для двох нуклонів, а складніші системи вони описують не зовсім задовільно і також є дуже складними для практичного використання. Для вирішення проблеми опису експериментальних даних для три- та чотиринуклонних систем за традицією додатково вводиться багаточастинкова взаємодія (наприклад, тричастинкова), що призводить до ще більшого ускладнення потенціалів.

Актуальною проблемою в теорії ядра є також дослідження різноманітних структурних особливостей малонуклонних ядер. Залишаються відкритими питання щодо впливу певних параметрів потенціалів взаємодії на ті чи інші властивості структурних функцій, а також пояснення асимптотичної поведінки структурних функцій. Використання складних реалістичних потенціалів нуклон-нуклонної взаємодії не може дати чіткого розуміння конкретних властивостей структурних функцій, оскільки дані потенціали містять багато різних доданків і параметрів. Тому зручніше пояснювати властивості структури малонуклонних ядер на прикладі більш простих потенціалів взаємодії, оскільки можна чітко стежити за впливом конкретної особливості потенціалу на поведінку відповідної структурної функції.

Отже, дослідження структурних особливостей малонуклонних ядер є важливою проблемою в сучасній ядерній фізиці і відкритим залишається питання про моделі ядерних взаємодій, зокрема, про двонуклонні потенціали взаємодії. Розвиток сучасної комп'ютерної техніки дозволяє запроваджувати нові високоточні методи розрахунків характеристик малонуклонних систем. Таким чином з'являється можливість поєднати побудову потенціалу взаємодії між нуклонами в досить простому вигляді з високоточним дослідженням структури малонуклонних ядер.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Роботи за темою дисертації виконувались в рамках тематичного плану науково-дослідних робіт відділу Прикладних проблем теоретичної фізики Інституту теоретичної фізики імені М. М. Боголюбова НАН України згідно з темами "Структурні особливості малонуклонних і мультікластерних ядерних систем та біляпорогові явища" 2007-2011 рр. (шифр 1.4.1, номер держреєстрації 0106U007888), "Багаточастинкові ефекти і структура ядерних та кулонівських систем" 2011-2012 рр. (шифр 1.4.1, номер держреєстрації 0112U000055) та цільовою програмою НАН України "Фундаментальні властивості фізичних систем в екстремальних умовах" (шифр 1.4.1, номер держреєстрації 0107U000396).

Метою і задачею дослідження є вивчення особливостей структури малонуклонних ядер для різних потенціалів нуклон-нуклонної взаємодії на основі варіаційного розрахунку з високою точністю. В дисертації поставлені задачі:

1. Створення методу розрахунку з високою точністю енергій зв'язку і хвильових функцій для ядер ${}^3\text{H}$, ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$;
2. Побудова потенціалів взаємодії між двома нуклонами в досить простому вигляді для одночасного опису основних експериментальних характеристик дво-, три- та чотиринуклонних систем;
3. Розрахунок і дослідження властивостей структурних функцій три- та чотиринуклонних ядер, таких як розподіли густини, кореляційні функції, формфактори, імпульсні розподіли нуклонів;
4. Дослідження кластерних властивостей тринуклонних ядер;
5. Вивчення асимптотичної поведінки структурних функцій.

Об'єктом дослідження є системи трьох та чотирьох нуклонів – ядра ${}^3\text{H}$, ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$. *Предметом дослідження* є особливості структури даних ядер, вплив ядерної взаємодії на їх структуру і асимптотична поведінка структурних функцій таких ядер. *Метод дослідження* полягає в чисельному розв'язку з високою точністю рівняння Шрьодінгера для три- та чотиринуклонної систем за допомогою варіаційного методу, розрахунку структурних функцій малонуклонних систем на основі отриманих високоточних варіаційних хвильових функцій, дослідженню кластерної структури тринуклонних ядер і асимптотичної поведінки структурних функцій.

Наукова новизна одержаних результатів. В дисертаційному дослідженні вперше одержано такі результати:

1. Створено методику розрахунку з високою точністю енергій зв'язку і хвильових функцій три- та чотиринуклонних ядер на основі варіаційного методу з оптимізованим гаусоїдним базисом в рамках представлення без ізоспіну;
2. Запропоновано схему побудови потенціалів нуклон-нуклонної взаємодії для одночасного опису всіх основних параметрів малонуклонних систем;
3. З високою точністю розраховано розподіли густини, парні кореляційні функції, формфактори і імпульсні розподіли нуклонів для малонуклонних ядер ${}^3\text{H}$, ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$ і виконано їх всебічний аналіз;
4. Дано кількісну оцінку імовірності існування зв'язаного дейтрона в зв'язаній системі трьох нуклонів;
5. Запропоновано асимптотичні формули, що описують поведінку розподілів густини і парних кореляційних функцій на великих відстанях;
6. Досліджено асимптотичну поведінку імпульсних розподілів і формфакторів при великих імпульсах.

Практичне значення одержаних результатів. Створена схема варіаційного розрахунку з високою точністю може застосовуватись для розрахунків характеристик три- та чотиринуклонних ядер для різних потенціалів взаємодії. Аналогічні схеми високоточного розрахунку можна використовувати і для розрахунків у складніших системах, наприклад, три- та

чотирикластерних. Структурні функції, досліджені в роботі, дають суттєве уявлення про особливості малонуклонних ядер і про взаємодію між нуклонами. Побудовані з міркувань сумісного опису основних параметрів малонуклонних систем потенціали нуклон-нуклонної взаємодії, можуть бути використані в різних розрахунках ядерних систем нарівні з відомими потенціалами взаємодії. Метод розрахунку коефіцієнтів кластеризації може бути застосований і до більш складних ядерних систем. Асимптотичні константи нормування для розподілів густини і парних кореляційних функцій також можуть знайти широке застосування.

Особистий внесок здобувача. Всі роботи, покладені в основу дисертації, виконано в співавторстві з проф. І. В. Симонопом, а робота [1] також і з Б. Є. Гринюком. Основні результати дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто наведені нижче. В роботі [1] дисертант виконав розрахунок і аналіз структурних функцій чотиринуклонного ядра ${}^4\text{He}$. В роботах [2 – 5] здобувачем реалізовано схему варіаційного розрахунку з гаусоїдними базисами, від аналітичних викладок до чисельного розрахунку і оптимізації енергетичного функціоналу за нелінійними варіаційними параметрами. В [2] ним запропоновано метод побудови потенціалів нуклон-нуклонної взаємодії для сумісного опису певних експериментальних характеристик малонуклонних ядер. В роботах [2 – 5] здобувач виконав розрахунок і аналіз розподілів густини, парних кореляційних функцій, формфакторів, імпульсних розподілів нуклонів для ядер ${}^3\text{H}$, ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$ для різних потенціалів взаємодії між нуклонами, зокрема і для нового потенціалу побудованого в [2]. В [3] ним також досліджено імовірність знаходження зв'язаної двонуклонної системи в зв'язаних тринуклонних системах, а в [4, 5] – асимптотичну поведінку структурних функцій малонуклонних ядер.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційного дослідження доповідалися на таких конференціях: International Conferences “Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy” NPAE-2006, NPAE-2008, NPAE-2010, NPAE-2012 (м. Київ); Міжнародних конференціях студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики ЄВРИКА-2007, ЄВРИКА-2008, ЄВРИКА-2009, ЄВРИКА-2010, ЄВРИКА-2011 (м. Львів); Боголюбівських читаннях-2007 Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова (м. Київ); Щорічній науковій конференції Інституту ядерних досліджень НАНУ (м. Київ, 2008 р.); Конференціях молодих вчених “Сучасні проблеми теоретичної фізики” Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова в 2009 та 2010 рр. (м. Київ); українсько-російському семінарі “Проблема декількох частинок із сильною та кулонівською взаємодіями” (м. Київ, 2012 р.); всього 14 конференцій. Також результати дисертаційної роботи обговорювались на чотирьох семінарах відділу прикладних проблем теоретичної фізики Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова (2008, 2009, 2010, 2012 рр.).

Публікації. Матеріали дисертаційної роботи опубліковано в 5 статтях у наукових реферованих журналах [1 – 5], 2 статтях в працях наукових конференцій [6, 7], а також в 11 публікаціях тез конференцій [8 – 18].

Структура дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаних джерел (150 найменувань). Кожний розділ починається з короткого вступу і закінчується висновками. Роботу написано на 121 сторінках машинописного тексту, вона містить 30 рисунків та 15 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У *вступі* сформульовано актуальність, мету та основні задачі роботи, показано наукову та практичну цінність отриманих результатів і коротко викладено зміст розділів дисертації.

В *першому розділі* описано сучасний стан проблеми опису малонуклонних систем. Виконано короткий огляд основних методів розрахунків характеристик малонуклонних ядер, які найбільш широко відомі в сучасній літературі. Також розглянуто проблему вибору потенціалів ядерної взаємодії від досить простих до складних сучасних “реалістичних” потенціалів взаємодії і їх застосування до три- та чотиринуклонних ядер.

Оригінальні результати подано в *розділах 2 – 4*.

Другий розділ присвячено опису методів розрахунку і побудові потенціалів взаємодії між нуклонами. Дано опис схеми варіаційного розрахунку параметрів три- та чотиринуклонних систем в рамках представлення без ізоспіну, коли нейтрон і протон вважаються різними частинками. Розглянуто потенціали взаємодії між нуклонами, що використано в розрахунках. В спрощеному вигляді описано схему побудови потенціалів нуклон-нуклонної взаємодії для одночасного опису основних характеристик дво-, три- та чотиринуклонних систем. Також описано схему розрахунку двонуклонних параметрів розсіяння.

В *підрозділі 2.2* описано представлення без ізоспіну, яке використовується в розрахунках. Представлення без ізоспіну дозволяє суттєво спростити розрахунки (зменшити кількість рівнянь) без втрати точності (І. В. Сименюк та ін., 2002).

В представленні без ізоспіну необхідно розв’язувати систему лише двох рівнянь для просторової частини хвильової функції замість системи чотирьох просторових рівнянь для ядра ${}^3\text{H}$ і шести рівнянь для ядра ${}^3\text{He}$, як це має місце у формалізмі ізоспіну. У представленні без ізоспіну повна хвильова функція для тринуклонних систем з нульовим орбітальним моментом та спіном $S=1/2$ має вигляд добутку спінових функцій (ζ', ζ'') на просторові (Φ_1, Φ_2) :

$$\Psi = \frac{1}{\sqrt{2}}(\zeta' \Phi_1 + \zeta'' \Phi_2), \quad (1)$$

де ζ' і ζ'' – компоненти спінової хвильової функції для $S=1/2$, а просторові компоненти Φ_1 і Φ_2 є, відповідно, симетричною і антисиметричною відносно перестановок координат однакових нуклонів. Тоді рівняння Шрьодінгера переходить в систему двох рівнянь для просторових компонент повної хвильової функції (І. В. Сименюк та ін., 2002):

$$\begin{aligned}
& \left[\hat{K} + \frac{e^2}{r_{12}} + V_{s(pp)}^+(r_{12}) - E \right] \Phi_1(123) + \frac{1}{8} \sum_{ij=13,23} \sum_{+,-} [3V_{t(np)}^\pm(r_{ij}) + V_{s(np)}^\pm(r_{ij})] [1 \pm P(ij)] \Phi_1(123) + \\
& + \frac{\sqrt{3}}{8} \sum_{ij=13,23} \sum_{+,-} (-1)^{i+j} [V_{s(np)}^\pm(r_{ij}) - V_{t(np)}^\pm(r_{ij})] [1 \pm P(ij)] \Phi_2(123) = 0, \\
& \left[\hat{K} + \frac{e^2}{r_{12}} + V_{t(pp)}^-(r_{12}) - E \right] \Phi_2(123) + \frac{1}{8} \sum_{ij=13,23} \sum_{+,-} [V_{t(np)}^\pm(r_{ij}) + 3V_{s(np)}^\pm(r_{ij})] [1 \pm P(ij)] \Phi_2(123) + \\
& + \frac{\sqrt{3}}{8} \sum_{ij=13,23} \sum_{+,-} (-1)^{i+j} [V_{s(np)}^\pm(r_{ij}) - V_{t(np)}^\pm(r_{ij})] [1 \pm P(ij)] \Phi_1(123) = 0. \tag{2}
\end{aligned}$$

Тут $\hat{K} = -\frac{\hbar^2}{2m_p}(\Delta_1 + \Delta_2) - \frac{\hbar^2}{2m_n}\Delta_3$ – кінетична енергія трьох нуклонів, $\hat{P}(ij)$ – оператор перестановки просторових координат нуклонів з номерами i та j . $V_t^\pm(r)$ і $V_s^\pm(r)$ – просторова частина двонуклонних потенціалів взаємодії в триплеті та синглеті і в парних (+) та непарних (–) станах за орбітальним моментом пари нуклонів. Номери 1 і 2 належать однаковим нуклонам (протонам в ядрі ${}^3\text{He}$ і нейтронам в ${}^3\text{H}$), а 3 – іншому нуклону, відповідно. У випадку ядра ${}^4\text{He}$ ($2n, 2p$) також маємо два рівняння аналогічні за структурою до тринуклонних систем.

Підрозділ 2.3 присвячено розв'язку систем рівнянь виду (2), де просторові компоненти варіаційної хвильової функції Φ_ν ($\nu=1,2$) мають вигляд суперпозиції гаусоїд. Наприклад, для нульового кутового моменту основного стану ядра ${}^3\text{He}$:

$$\Phi_\nu = \hat{S}_\nu \sum_{k=1}^{N_\nu} D_k^{(\nu)} \varphi_k^{(\nu)} \equiv \hat{S}_\nu \sum_{k=1}^{N_\nu} D_k^{(\nu)} \exp\left(-\left(a_k^{(\nu)} r_{12}^2 + b_k^{(\nu)} r_{13}^2 + c_k^{(\nu)} r_{23}^2\right)\right), \tag{3}$$

де φ_ν – гаусоїдні базисні функції, N_ν – розмірність базису (N_1 для функції Φ_1 та N_2 для функції Φ_2), \hat{S}_ν – відповідний оператор симетризації для функцій Φ_1 (симетричної) і Φ_2 (антисиметричної) відносно перестановок тотожних протонів ($1 \leftrightarrow 2$). Кожна базисна гаусоїдна функція залежить лише від трьох відносних відстаней і містить відповідно три нелінійних варіаційних параметри $a_k^{(\nu)}, b_k^{(\nu)}, c_k^{(\nu)}$. З використанням гаусоїдного базису для хвильових функцій явний вигляд енергетичної матриці отримується безпосередньо.

$$\begin{aligned}
& \sum_{n=1}^{N_1} D_n^{(1)} \left(\langle S\varphi_m^{(1)} | \hat{H}_{11} | S\varphi_n^{(1)} \rangle - E \langle S\varphi_m^{(1)} | S\varphi_n^{(1)} \rangle \right) + \sum_{n=1}^{N_2} D_n^{(2)} \langle S\varphi_m^{(1)} | \hat{H}_{12} | S\varphi_n^{(2)} \rangle = 0, \\
& \sum_{n=1}^{N_1} D_n^{(1)} \langle S\varphi_k^{(2)} | \hat{H}_{21} | S\varphi_n^{(1)} \rangle + \sum_{n=1}^{N_2} D_n^{(2)} \left(\langle S\varphi_k^{(1)} | \hat{H}_{22} | S\varphi_n^{(2)} \rangle - E \langle S\varphi_k^{(2)} | S\varphi_n^{(2)} \rangle \right) = 0, \tag{4}
\end{aligned}$$

У варіаційному методі Гальоркіна з лінійної алгебраїчної системи рівнянь (4) знаходяться лінійні коефіцієнти розкладу $D_n^{(\nu)}$ (вектор станів) і повні хвильові функції у вигляді суперпозиції гаусоїд. Лінійні коефіцієнти $D_n^{(\nu)}$ виступають у ролі варіаційних параметрів нарівні з іншими нелінійними варіаційними параметрами у випадку використання прямого варіаційного принципу Рітца.

Найбільш складним елементом в реалізації схеми варіаційного розрахунку є оптимізація енергетичного функціоналу за нелінійними варіаційними параметрами. В дисертації дану проблему вирішено поєднанням стохастичної мінімізації на початковому етапі з прямою при подальшому уточненні. При стохастичній мінімізації нелінійні параметри генеруються випадково і це дозволяє досить швидко наблизитися до області мінімуму. А потім зміною варіаційних параметрів з деякими кроками і напрямком покращується знаходження мінімуму.

Аналогічно варіаційна схема застосовується і для чотиринуклонного ядра ${}^4\text{He}$, лише варіаційна хвильова функція має дещо складніший вигляд і містить в кожній компоненті по шість нелінійних варіаційних параметрів.

В *підрозділі 2.4* описано метод фазових функцій (В. В. Бабинов, 1976), який використовується в роботі для пошуку параметрів розсіяння двох нуклонів, таких як фази розсіяння, довжини розсіяння і ефективні радіуси взаємодії в триплетному і синглетному станах.

Підрозділ 2.5 присвячено потенціалам нуклон-нуклонної взаємодії, які використовувалися в розрахунках. Тут описано потенціали Мінесоти (далі М), Ефнана-Танга (АТ), а також “київські” потенціали К1 і К2, що побудовані в роботі. Велика увага приділяється опису схеми побудови потенціалів взаємодії з міркувань сумісного опису основних експериментальних характеристик дво-, три- та чотиринуклонних ядер. В результаті побудовано потенціал К2, який вважається найкращим для сумісного опису малонуклонних ядер:

$$\begin{aligned}
 V_{s(nn)}(r) &= 817,0 \exp\left[-\left(\frac{r}{0,63}\right)^2\right] - 206,34 \exp\left[-\left(\frac{r}{1,18}\right)^2\right], \\
 V_{s(pp)}(r) &= 490,0 \exp\left[-\left(\frac{r}{0,68}\right)^2\right] - 151,07 \exp\left[-\left(\frac{r}{1,27}\right)^2\right], \\
 V_{s(np)}(r) &= 3950,0 \exp\left[-\left(\frac{r}{0,55}\right)^2\right] - 381,38 \exp\left[-\left(\frac{r}{1,1}\right)^2\right], \\
 V_{t(np)}(r) &= 3720,0 \exp\left[-\left(\frac{r}{0,488}\right)^2\right] - 528,59 \exp\left[-\left(\frac{r}{0,976}\right)^2\right].
 \end{aligned} \tag{5}$$

Тут всі радіуси мають розмірність фм, енергії – МеВ.

В *підрозділі 2.6* наведено результати для енергій зв'язку, середньоквадратичних радіусів, а також двонуклонних параметрів, які отримано з потенціалами М, АТ, К1 і К2.

В *третьому розділі* описано розподіли густини і парні кореляційні функції в тринуклонних ядрах ${}^3\text{H}$, ${}^3\text{He}$ і чотиринуклонному ядрі ${}^4\text{He}$. Розглянуто різні властивості таких функцій, особливо в залежності від нуклон-нуклонної взаємодії. Описано асимптотики розподілів густини і кореляційних функцій на великих відстанях.

В *підрозділах 3.2 і 3.3* розглядаються розподіли густини в ядрах ${}^3\text{H}$, ${}^3\text{He}$ і ${}^4\text{He}$ та їх основні властивості.

Варіаційний метод з гаусоїдним базисом дозволяє отримати в зручному для використання вигляді хвильові функції системи з високою точністю. На

основі хвильових функцій можна розраховувати різні структурні функції, наприклад, розподіли густини. Розподіл густини визначає імовірність нуклона в ядрі знаходитися на певній відстані від центру мас ядра. Масовий розподіл густини для системи з A нуклонів визначено як

$$\rho_m(r) = \langle \Psi | \frac{1}{A} \sum_{i=1}^A \delta(\vec{r} - (\vec{r}_i - \vec{R}_{c.m.})) | \Psi \rangle, \quad (6)$$

Розподіли густини протонів та нейтронів обчислюються аналогічно. Варто нагадати, що для пошуку зарядового розподілу потрібно врахувати неточковість нуклонів, що зроблено в роботі стандартним чином в рамках відомої моделі Хелма.

В роботі обчислено масові, протонні та нейтронні розподіли густини, а також зарядові розподіли. Серед їх властивостей варто зупинитися, насамперед, на немонотонностях на малій відстані в поведінці масових, протонних та нейтронних розподілах густини для тринуклонних ядер, хоча провали на малій відстані відсутні незважаючи на відштовхування великих інтенсивностей. Показано, що немонотонність прямо пов'язана з сильним відштовхуванням в потенціалі нуклон-нуклонної взаємодії на малих відстанях. При розрахунку розподілу густини заряду така немонотонність згладжується. Для чотиринуклонного ядра ${}^4\text{He}$ немонотонності в поведінці масових, протонних та нейтронних розподілів густини не спостерігаються. Одні й ті ж розподіли густини для різних потенціалів достатньо близькі на більшій відстані $r \geq 1.0$ фм, оскільки вибрані потенціали дають близькі значення енергій зв'язку та розмірів для конкретного ядра. В той же час на малих відстанях у розподілах густини проявляються певні немонотонності в залежності від величини короткосяжного відштовхування між нуклонами.

В підрозділах 3.4 і 3.5 описано парні кореляційні функції та їх властивості для ядер ${}^3\text{H}$, ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$. Кореляційна функція в різних спінових станах двох нуклонів

$$g_{ij}(r) = \langle \Psi | \delta(\vec{r} - \vec{r}_{ij}) P(\sigma_i \sigma_j) | \Psi \rangle \quad (7)$$

визначає імовірність двох частинок у системі знаходитися на певній відстані між собою. У виразі (7) $P(\sigma_i \sigma_j)$ – проекційний спіновий оператор на триплетний або синглетний стани двох нуклонів. Підкреслимо, що через дані функції визначається середня потенціальна енергія між парою нуклонів в ядрі: $\langle V \rangle = \int d\vec{r} V(r) g(r)$. Основною властивістю парних кореляційних функцій є наявність провалу на малій відстані. Глибина провалу безпосередньо залежить від величини короткосяжного відштовхування у відповідному потенціалі взаємодії. В дисертації також описано радіуси кореляції, розраховані на основі парних кореляційних функцій, які описують відносні відстані між нуклонами в ядрах. Встановлено їх зв'язок з середньоквадратичними радіусами відповідних ядер.

Підрозділ 3.6 присвячений дослідженню поведінки розподілів густини і парних кореляційних функцій на великих відстанях. Насамперед, описується асимптотика хвильових функцій чотиринуклонної та тринуклонних систем. Для тринуклонних систем використовується відома асимптотика Меркур'єва

(С. П. Меркурьев, 1974) у спрощеному вигляді, у випадку чотиринуклонних систем використовується асимптотика, отримана нами в найпростішому вигляді, коли хвильова функція чотиринуклонної системи залежить лише від гіперрадіусу і не залежить від кутових змінних. За допомогою підстановки асимптотик хвильових функцій у визначення розподілів густини і кореляційних функцій отримано асимптотики для відповідних структурних функцій чотиринуклонної системи ${}^4\text{He}$. Вони мають вигляд

$$\rho(r) \approx \rho_0 \frac{\exp(-\mu r)}{r^5}, \quad \mu = 2\sqrt{\frac{8}{3}m|E|}, \quad g(r) \approx g_0 \frac{\exp(-\lambda r)}{r^5}, \quad \lambda = 2\sqrt{m|E|}, \quad r \rightarrow \infty \quad (8)$$

для чотиринуклонного ядра ${}^4\text{He}$ ($|E|$ – енергія зв’язку ядра ${}^4\text{He}$).

$$\rho(r) \approx \rho_0 \frac{\exp(-\mu r)}{r^{7/2}}, \quad \mu = 2\sqrt{3m|E|}, \quad g(r) \approx g_0 \frac{\exp(-\lambda r)}{r^{7/2}}, \quad \lambda = 2\sqrt{m|E|}r, \quad r \rightarrow \infty \quad (9)$$

у випадку тринуклонних ядер ($|E|$ – енергія зв’язку відповідного ядра).

Отримано узгодження асимптотик (8, 9) з розрахованими структурними функціями на великій відстані. Знайдені асимптотичні константи нормування для різних ядер і для різних функцій.

В **четвертому розділі** розглянуто формфактори і імпульсні розподіли нуклонів в ядрах ${}^3\text{H}$, ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$, а також кластерні властивості тринуклонних ядер ${}^3\text{H}$, ${}^3\text{He}$. В *підрозділах 4.2, 4.3 та 4.4* обговорюються властивості формфакторів ядер ${}^3\text{H}$, ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$, зокрема поведінка формфакторів тринуклонних ядер при малих переданих імпульсах (*підрозділ 4.3*).

Формфактор визначається як Фур’є-компонента відповідного розподілу густини. Неточковість нуклонів враховано в стандартній моделі Хелма. На Рис. 1 зображено порівняння розрахованих зарядових формфакторів з експериментом. Видно, що найкращий опис експерименту дає потенціал K2.

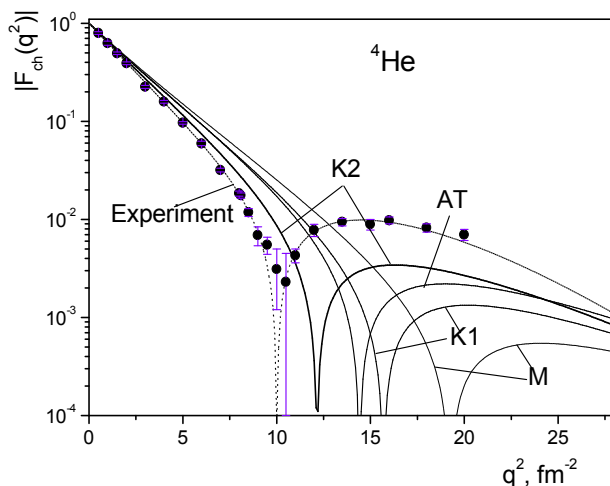


Рис. 1. Зарядовий формфактор в ядрі ${}^4\text{He}$ для різних потенціалів нуклон-нуклонної взаємодії.

В *підрозділі 4.3* запропоновано нове представлення для опису формфакторів тринуклонних ядер при малих переданих імпульсах.

В *підрозділах 4.5 і 4.6* розглянуто імпульсні розподіли нуклонів для три- та чотиринуклонних ядер. Імпульсний розподіл $n(k)$ визначає імовірність

нуклона в системі мати певний імпульс і через нього виражається середня кінетична енергія $\langle K \rangle = \int d\vec{k} \frac{k^2}{2m} n(k)$. Імпульсний розподіл нуклонів визначено як

$$n(k) = \langle \tilde{\Psi} | \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta(\vec{k} - (\vec{k}_i - \vec{P}_{c.m.})) | \tilde{\Psi} \rangle, \quad (10)$$

де $\tilde{\Psi}$ – хвильова функція трьох нуклонів задана в імпульсному представленні; $\vec{P}_{c.m.}$ – імпульс центра мас системи.

На Рис. 2 зображено імпульсні розподіли протонів в тринуклонному ядрі ${}^3\text{He}$, розраховані для різних потенціалів взаємодії, а також експериментальні дані (С. Ciofi degli Atti *et al*, 1996). Відзначимо, що між областю малих та великих імпульсів існує різка зміна режиму, що є прямою вказівкою на наявність відштовхування між нуклонами на малих відстанях. З Рис. 2 видно, що в області малих імпульсів усі криві близькі й гарно узгоджуються з експериментом – дана область відповідає більшим відстаням, а там потенціали сприймаються лише в середньому. В області ж більших імпульсів після зміни режиму суттєвий вплив має детальна поведінка потенціалів взаємодії на малих відстанях (або великих імпульсів), де проявляється відштовхування.

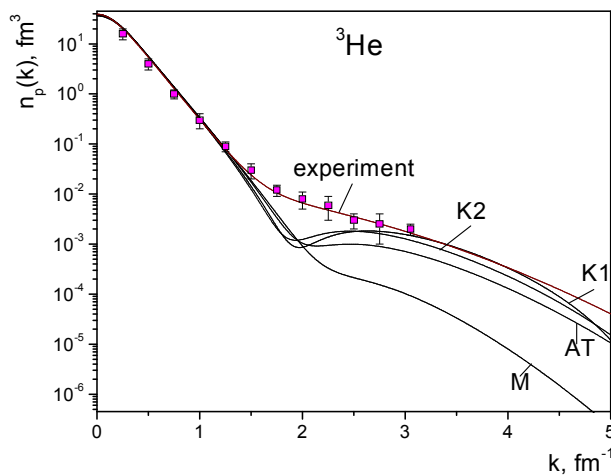


Рис. 2. Імпульсні розподіли протонів в тринуклонному ядрі ${}^3\text{He}$ розраховані для різних потенціалів взаємодії.

У випадку чотиринуклонного ядра ${}^4\text{He}$ імпульсні розподіли розраховано аналогічно. І також одержано досить гарне узгодження з експериментом.

В *підрозділі 4.7* розглянуто асимптотичну поведінку формфакторів та імпульсних розподілів при великих імпульсах. Дані асимптотики розглядалися, зокрема, в роботі (R. D. Amado *et al*, 1976). Виявлено, що асимптотика формфакторів суттєво залежить від вигляду нуклон-нуклонного потенціалу. Асимптотику для імпульсних розподілів запропоновано для будь-яких ядер в (R. D. Amado *et al*, 1976) у вигляді

$$n(k) \sim \left(\frac{v(k)}{k^2} \right)^2, \quad k \rightarrow \infty, \quad (11)$$

де $v(k)$ – Фур'є-компонента від відповідного потенціалу нуклон-нуклонної взаємодії.

На Рис. 3 наведено графік розрахованого в роботі імпульсного розподілу протонів в ядрі ${}^3\text{H}$, розрахований для потенціалу М. Тут побудовано також

криві для асимптотики (11) з використанням компоненти потенціалу взаємодії з найменшим радіусом (для великих k) та крива для малих k , що відповідає найбільшому радіусу в потенціалах (притягування в синглеті). Досить чітко видно, що дані асимптотики задовільно узгоджуються з розрахованим імпульсним розподілом в різних областях імпульсів i , таким чином, проілюстровано наявність зміни режиму поведінки імпульсних розподілів завдяки присутності притягування і відштовхування в ядерних потенціалах взаємодії різних радіусів дії.

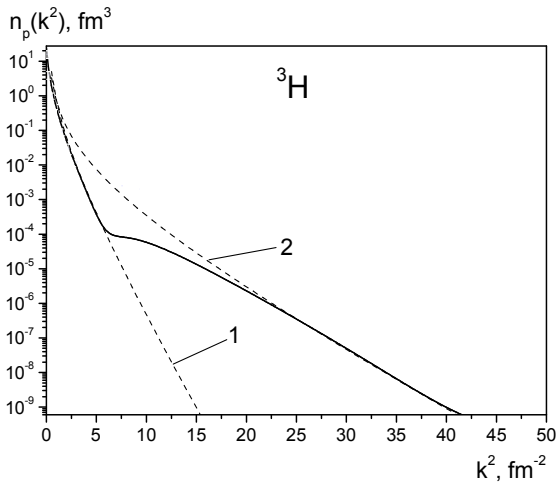


Рис. 3. Крива імпульсного розподілу протонів в тритоні, розрахована для потенціалу М. Крива 1 – асимптота, якщо використано лише синглетне притягування, крива 2 – відштовхування.

В *підрозділі 4.8* розглянуто імовірність присутності дейтрона у тринуклонних системах (G. F. Filippov, V. I. Ovcharenko, I. V. Simenog, 1971). Таким чином хвильова функція тринуклонної системи проектується на хвильову функцію дейтрона. Отримано вираз для квадрата амплітуди кластеризації основного стану трьох нуклонів (наприклад, ^3He) на основний стан двох нуклонів і третій нуклон

$$f_{0,0}(\rho)^2 = \left| \int \Psi_d(\vec{r}) \Psi(\vec{r}, \vec{\rho}) d\vec{r} \right|^2, \quad (12)$$

тут виконано підсумування за спільними спіновими змінними тринуклонної системи та системи „дейтрон + нуклон”.

Коефіцієнт кластеризації C визначено як інтеграл

$$C = \int f^2_{0,0}(\rho) d\vec{\rho}. \quad (13)$$

Зауважимо, що сума коефіцієнтів кластеризації C за всіма можливими двочастинковим станами підсистеми двох нуклонів дорівнює одиниці.

Коефіцієнти кластеризації для різних потенціалів взаємодії є близькими – дейтрон у зв'язаному стані в системі трьох нуклонів існує з імовірністю близько 70 %. Це є конкретна відповідь на питання „Чи міститься дейтрон в тритоні?”, яке широко дискутувалось свого часу (Д. А. Киржниц, 1978). Отже, зв'язаний стан трьох нуклонів лише грубо можна розглядати як систему двох частинок – дейтрона й нуклона.

Було введено модифіковані коефіцієнти кластеризації в тринуклонних системах, коли замість хвильової функції двонуклонної підсистеми (дейтрона) в інтегралі перекриття (12) підставлено квадратний корінь із кореляційної функції між протоном і нейтроном у триплетному стані

$$f_g(\rho) = \left\langle \sqrt{g(\vec{r})} \left| \Psi(\vec{r}, \vec{\rho}) \right\rangle_r \quad (14)$$

і аналогічним чином визначено модифіковані коефіцієнти кластеризації

$$C_g = \int f_g^2(\rho) d\vec{\rho}. \quad (15)$$

При цьому використано ту обставину, що парні кореляційні функції визначають імовірність знаходження пари частинок (дейтрона) на заданій відстані й у певному спіновому стані, але вже в середовищі (у присутності третьої частинки), тоді як хвильова функція дейтрона описує вільний дейтрон. Тобто можна вважати, що кореляційні функції є квадратами ефективних хвильових функцій пар частинок у середовищі. Модифіковані коефіцієнти кластеризації C_g із виразу (15) суттєво більші за коефіцієнти C з виразу (13) і становлять більше 90 %.

Запропоновані модифіковані коефіцієнти кластеризації дають змогу також розглянути імовірність існування синглетного дінейтрона в тритоні. Для цього використано синглетну кореляційну функцію двох нейтронів $g_{nn,s}(r)$ в ядрі ${}^3\text{H}$. Імовірність існування синглетного дінейтрона в тритоні становить порядку 40 %.

ВИСНОВКИ

1. Створено метод розрахунку з високою точністю енергій зв'язку та інших параметрів малонуклонних ядер ${}^3\text{H}$, ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$ з використанням варіаційного методу з гаусоїдними базисами в рамках представлення без ізоспіну.
2. Запропоновано схему побудови потенціалів нуклон-нуклонної взаємодії у досить простій формі для сумісного опису основних експериментальних характеристик дво-, три- та чотиринуклонних систем. Побудовано варіанти потенціалів K1 і K2, які дозволяють описати енергії зв'язку і розміри ядер ${}^2\text{H}$, ${}^3\text{H}$, ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$, довжини розсіяння і ефективні радіуси взаємодії двох нуклонів в синглетному і триплетному станах. Дані потенціали також дають непогане узгодження і для інших величин, що вимірюються на експерименті, зокрема, для імпульсних розподілів протонів.
3. З високою точністю розраховано енергії зв'язку і розміри малонуклонних ядер. На основі високоточних хвильових функцій, які отримано з варіаційного розрахунку, розраховано розподіли густини, формфактори, парні кореляційні функції та імпульсні розподіли нуклонів в ядрах ${}^3\text{H}$, ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$. Виконано докладне дослідження даних структурних функцій. Зокрема, виявлено, що немонотонності в поведінці розподілів густини на менших відстанях в тринуклонних ядрах пов'язані з відштовхуванням в потенціалах взаємодії. Пояснено, що глибина провалів на малій відстані в парних кореляційних функціях прямо залежить від величини короткосяжного відштовхування в потенціалах взаємодії між нуклонами.
4. Розраховано коефіцієнти кластеризації для тринуклонних ядер на основі хвильових функцій дейтрона і тринуклонних систем, а також з

використанням парних кореляційних функцій. Одержано кількісні значення імовірності існування дейтрона та дінейтрона в зв'язаних тринуклонних ядрах для різних використаних в роботі потенціалів нуклон-нуклонної взаємодії.

5. Вперше отримано асимптотичні формули, що описують поведінку розподілів густини і парних кореляційних функцій на великих відстанях. Визначено відповідні асимптотичні константи нормування.
6. Запропоновано модифіковану формулу для опису поведінки формфакторів в області малих переданих імпульсів. Показано, що дана формула може бути використана для більш зручного і точного визначення середньоквадратичних радіусів з експерименту.
7. Для імпульсних розподілів і формфакторів досліджено поведінку при великих значеннях імпульсів. Проаналізовано внески, які дають відштовхування і притягування в потенціалах взаємодії в поведінку імпульсних розподілів нуклонів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Grinyuk V. E. Structure characteristics of a ^4He nucleus within the microscopic approach / V. E. Grinyuk, D. V. Piatnytskyi, I. V. Simenog // Ukr. J. Phys. – 2007. – Vol. 52, № 5. – P. 424 – 435.
2. Piatnytskyi D. V. Nuclear potentials for joint description of few-nucleon systems and structure functions of three-nucleon nuclei / D. V. Piatnytskyi, I. V. Simenog // Ukr. J. Phys. – 2008. – Vol. 53, № 7. – P. 629 – 639.
3. П'ятницький Д. В. Кореляційні функції, імпульсні розподіли та коефіцієнти кластеризації для тринуклонних ядер / Д. В. П'ятницький, І. В. Сименог // Ядерна фізика та енергетика – 2009. – Т. 10, № 1. – С. 36 – 44.
4. П'ятницький Д. В. Асимптотики розподілів густини, імпульсних розподілів та формфакторів тринуклонних ядер / Д. В. П'ятницький, І. В. Сименог // Ядерна фізика та енергетика – 2010. – Т. 11, № 1. – С. 16 – 24.
5. П'ятницький Д. В. Структурні функції ядра ^4He та їхні асимптотики / Д. В. П'ятницький // Ядерна фізика та енергетика – 2011. – Т. 12, № 4. – С. 339 – 346.
6. Simenog I. V. Structure properties of three-nucleon systems / I. V. Simenog, D. V. Piatnytskyi // Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy, NPAE-2008: 2nd International Conference, 9 – 15 June 2008: proceedings. Ukraine, Kyiv. – 2009. – Part I. – P. 411 – 415.
7. Piatnytskyi D. V. Asymptotics of structure functions of three-nucleon nuclei / D. V. Piatnytskyi, I. V. Simenog // Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy, NPAE-2010: 3rd International Conference, 7 – 12 June 2010: proceedings. Ukraine, Kyiv. – 2011. – Part I. – P. 221 – 225.
8. Grinyuk V. E. The structure peculiarities of ^4He within a precise approach / V. E. Grinyuk, D. V. Piatnytskyi, I. V. Simenog // Current Problems in Nuclear

- Physics and Atomic Energy, NPAE-2006: International Conference, 29 May – 3 June 2006: book of abstracts. Ukraine, Kyiv, 2006. P. 40 – 41.
9. П'ятницький Д. Прецизійне дослідження структурних функцій малонуклонних ядер / Дмитро П'ятницький, Іван Сименюг // ЕВРИКА-2007: Міжнародна конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики, 22 – 24 травня 2007 р.: тези доповідей. Україна, Львів, 2007. С. А7.
 10. П'ятницький Д. Особливості структури тринуклонних систем і нуклон-нуклонна взаємодія / Д. П'ятницький, І. Сименюг // ЕВРИКА-2008: Міжнародна конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики, 19 – 21 травня 2008 р.: тези доповідей. Україна, Львів, 2008. С. А18.
 11. Piatnytskyi D. V. Structure properties of three-nucleon systems / D. V. Piatnytskyi, I. V. Simenog // Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy, NPAE-2008: 2nd International Conference, 9 – 15 June 2008: book of abstracts. Ukraine, Kyiv, 2008. P. 102.
 12. П'ятницький Д. Коефіцієнти кластеризації і асимптотики структурних функцій малонуклонних ядер / Дмитро П'ятницький, Іван Сименюг // ЕВРИКА-2009: Міжнародна конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики, 20 – 22 травня 2009 р.: тези доповідей. Україна, Львів, 2009. С. В21.
 13. П'ятницький Д. В. Асимптотики структурних функцій тринуклонних ядер / Д. В. П'ятницький // Сучасні проблеми теоретичної фізики: Конференція молодих вчених, 24 – 26 грудня 2009 р.: Тези доповідей, Україна, Київ. С. 49.
 14. П'ятницький Д. Структурні функції тринуклонних ядер і їх асимптотики / Д. П'ятницький, І. Сименюг // ЕВРИКА-2010: Міжнародна конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики, 19 – 21 травня 2010 р.: тези доповідей. Україна, Львів, 2010. С. В24.
 15. Piatnytskyi D. V. Asymptotics of structure functions of three-nucleon nuclei / D. V. Piatnytskyi, I. V. Simenog // Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy, NPAE-2010: 3rd International Conference, 7 – 12 June 2010: book of abstracts. Ukraine, Kyiv, 2010. P. 55 – 56.
 16. Piatnytskyi D. V. Structure functions of ^4He nucleus / D. V. Piatnytskyi, I. V. Simenog // Modern Problems of Theoretical Physics: Young scientists conference, 22 – 24 December 2010: Book of abstracts. Ukraine, Kyiv. P. 65.
 17. П'ятницький Д. Структурні функції ядра ^4He / Дмитро П'ятницький, Іван Сименюг // ЕВРИКА-2011: Міжнародна конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики, 18 – 20 травня 2011 р.: тези доповідей. Україна, Львів, 2011. С. В22.
 18. Piatnytskyi D. V. Structure properties of ^4He nucleus / D. V. Piatnytskyi, I. V. Simenog // Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy, NPAE-2012: 4th International Conference, 3 – 7 September 2012: book of abstracts. Ukraine, Kyiv, 2012. P. 83 – 84.

АНОТАЦІЯ

П'ятницький Д. В. Варіаційні розрахунки структурних особливостей малонуклонних ядер. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізикоматематичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика. – Інститут теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України, Київ, 2012.

В дисертаційній роботі виконано дослідження особливостей структури три- та чотиринуклонних ядер ^3H , ^3He , ^4He . Використано варіаційні розрахунки для різних потенціалів взаємодії між нуклонами. З міркувань сумісного опису основних експериментальних характеристик малонуклонних ядер побудовано нові варіанти потенціалів. Запропоновано метод розрахунку з високою точністю енергій зв'язку та інших параметрів малонуклонних ядер ^3H , ^3He , ^4He з використанням варіаційного методу з гаусоїдними базисами в рамках представлення без ізоспіну. Розраховано енергії основного стану, середньоквадратичні радіуси ядер ^3H , ^3He , ^4He , а також розподіли густини, формфактори, парні кореляційні функції та імпульсні розподіли нуклонів. Виконано докладне дослідження основних структурних функцій. Встановлено асимптотичну поведінку розподілів густини, парних кореляційних функцій та імпульсних розподілів. Вивчено кластерні властивості тринуклонних ядер.

Ключові слова: малонуклонні системи, варіаційний метод, структура ядер, кластеризація, асимптотики структурних функцій.

АННОТАЦИЯ

Пятницкий Д. В. Вариационные расчеты структурных особенностей малонуклонных ядер. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физикоматематических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика. – Институт теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова НАН Украины, Киев, 2012.

В диссертационной работе исследованы особенности структуры трех- и четырехнуклонных ядер ^3H , ^3He , ^4He . Используются вариационные расчеты для разных потенциалов взаимодействия между нуклонами. Для совместного описания основных экспериментальных характеристик малонуклонных ядер построены новые варианты потенциалов. Предложен метод расчета с высокой точностью энергий связи и других параметров ядер ^3H , ^3He , ^4He с использованием вариационного метода с гауссоидальными базисами в рамках представления без изоспина. Рассчитаны энергии основного состояния, среднеквадратические радиусы ядер, а также распределения плотности, формфакторы, парные корреляционные функции и импульсные распределения ядер для ядер ^3H , ^3He , ^4He . Выполнено глубокое исследование основных структурных функций. Установлено асимптотическое поведение распределений плотности, парных корреляционных функций и импульсных распределений. Изучены кластерные свойства тринуклонных ядер.

Ключевые слова: малонуклонные системы, вариационный метод, структура ядер, кластеризация, асимптотики структурных функций.

ABSTRACT

Piatnytskyi D. V. Variational calculations of structure peculiarities of few-nucleon nuclei. – Manuscript.

Thesis for the candidate's degree in speciality 01.04.02 – theoretical physics. – Bogolyubov Institute for Theoretical Physics of NAS of Ukraine, Kyiv, 2012.

The present thesis investigates structure peculiarities of three- and four-nucleon nuclei ${}^3\text{H}$, ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$ using high accurate variational calculation for different potentials of nucleon-nucleon interaction, especially the potential constructed for simultaneous description of all the main experimental characteristics of a few-nucleon systems. The behavior of density distributions, form factors, two-nucleon correlation functions and momentum distributions of ${}^3\text{H}$, ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$ nuclei is studied. The cluster properties of ${}^3\text{H}$, ${}^3\text{He}$ are investigated.

The method of accurate calculation of binding energies and other parameters of few-nucleon systems ${}^3\text{H}$, ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$ is developed using the variational scheme with Gaussian bases within the representation without isospin. The representation without isospin where proton and neutron are considered as different nucleons is completely equivalent to the standard isospin formalism, but it reduces the number of equations for coordinate part of total wave function. Variational method with Gaussian bases allows to calculate binding energies of three- and four-nucleon systems with high and controlled accuracy. The wave functions of three- and four-nucleon systems are also obtained from variational calculation in explicit form as the superposition of Gaussians. The optimization of energy functional by nonlinear variational parameters is the main difficulty in numerical realization of variational scheme. The present thesis solves this problem by combination of stochastic (on the initial stage) and direct (on further stages) schemes of minimization.

The scheme of construction of nucleon-nucleon potentials in simple form for simultaneous description of experimental data for few-nucleon systems is proposed. The version of potential is constructed, it describes binding energies and r.m.s. radii of ${}^2\text{H}$, ${}^3\text{H}$, ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$ nuclei, scattering lengths and effective radii of interaction in singlet and triplet states for two nucleons. It also gives good results for charge form factors and proton momentum distributions in three- and four-nucleon systems.

The binding energies and r.m.s. radii of ${}^3\text{H}$, ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$ nuclei are calculated. It is shown that the potential constructed by us can simultaneously describe ground state energies of ${}^3\text{H}$, ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$, and Coulomb energy. Density distributions, form factors, two-nucleon correlation functions and momentum distributions are obtained using the accurate wave functions of three- and four-nucleon systems. The detailed analysis of these structure functions is carried out. It is found that the short-range nonmonotonies in density distributions for three-nucleon nuclei when nucleons considered as point-like are concerned with repulsion in potentials of interaction. Such nonmonotonies in density distributions are absent in four-nucleon nucleus ${}^4\text{He}$. Nonmonotonies also disappear when the non-point nucleons are taken into account. It is explained that the depth of dips at short radii in two-nucleon correlation functions directly depends on

intensity of short-range repulsion in nucleon-nucleon potentials. Stronger repulsion gives deeper short-radius dip. Also the correlation r.m.s. radii are calculated using two-nucleon correlation functions. Their correspondence with r.m.s. radii is shown. A good agreement with experiment is obtained for calculated charge form factors and proton momentum distributions, especially for potential constructed for simultaneous description of few-nucleon experimental data.

Asymptotic behavior of density distributions and two-nucleon correlation functions is studied. The well-known Merkuriev asymptotic of three-nucleon wave function is used, and simplified asymptotic of four-nucleon wave function is proposed. The asymptotic formulae for density distributions and correlation functions are obtained. These asymptotics have good agreement with calculated curves. Asymptotical normalization constants are obtained.

The study of asymptotics of form factors and momentum distributions at high momenta is carried out. It is shown that the well-known form factor asymptotic formula strongly depends on the form of nuclear potential. The asymptotic of momentum distributions is studied and contributions of repulsion and attraction in nucleon-nucleon potentials into the behavior of momentum distributions are analyzed. The asymptotic expansion of form factors at small momentum transfer is proposed. This research shows that such an expansion can be used for more accurate and convenient experimental determination of r.m.s. radii.

The cluster coefficients are calculated for three-nucleon nuclei ${}^3\text{H}$, ${}^3\text{He}$ using the wave functions of deuteron and three-nucleon systems. Also the other definition of cluster coefficients based on two-nucleon correlation functions of three-nucleon systems is introduced. The quantitative value for probability of bound deuteron existence in bound three-nucleon nuclei is obtained for different potentials of nuclear interaction. For the first type of cluster coefficients it is about 70 %, for the second definition – more than 90 %. The cluster coefficients for other two-nucleon clusters can be calculated using the definition with correlation functions. For example, the probability of existence of bound dineutron in three-nucleon system is nearly 40 %.

Key words: few-nucleon systems, variational method, structure of nuclei, clusterization, asymptotics of structure functions.

П'ятницький Дмитро Валерійович

Варіаційні розрахунки структурних особливостей малонуклонних ядер.
(Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук.)

Зам. – 39

Формат 60 x 84/16

Обл.-вид. арк. - 0.93

Підписано до друку 17.12.2012 р.

Тираж 100 прим.

Поліграфічна дільниця ІТФ ім. М.М. Боголюбова НАН України,
03680, м. Київ, вул. Метрологічна, 14-б