

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

**ЖАБА ВІКТОР ІВАНОВИЧ**

УДК 539.12.01

**ХВИЛЬОВА ФУНКЦІЯ І ПОЛЯРИЗАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ПРОЦЕСІВ ЗА УЧАСТЮ ДЕЙТРОНА**

01.04.16 – фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі теоретичної фізики фізичного факультету ДВНЗ «Ужгородського національного університету» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат фізико-математичних наук, доцент  
**Гайсак Іван Іванович**,  
доцент кафедри теоретичної фізики  
ДВНЗ «Ужгородського національного університету».

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник  
**Михайлюк Вадим Петрович**,  
завідувач лабораторії теорії ядерних взаємодій та  
процесів відділу структури ядра  
Інституту ядерних досліджень НАН України;

доктор фізико-математичних наук,  
старший дослідник  
**Лашко Юлія Анатоліївна**,  
провідний науковий співробітник лабораторії структури  
атомних ядер відділу теорії ядра і квантової теорії поля  
Інституту теоретичної фізики імені М.М. Боголюбова  
НАН України.

Захист відбудеться 15 квітня 2021 року о 14<sup>45</sup> на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.167.01 Інституту ядерних досліджень НАН України за адресою: 03028, м. Київ, проспект Науки, 47.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту ядерних досліджень НАН України, 03028, м. Київ, проспект Науки, 47.

Автореферат розісланий " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2021 року.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
кандидат фізико-математичних наук



Хоменков В.П.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми дисертації.** Після відкриття нейтрона Дж. Чедвіком (1932 р.) розпочалися плідні теоретичні й експериментальні дослідження нуклон-нуклонного розсіяння. З теоретичного боку були запропоновані відповідні моделі нуклон-нуклонної взаємодії (див. п. 1.2). Основними групами потенціалів є феноменологічні потенціали, моделі бозонного обміну, потенціали в рамках ефективної теорії поля та моделі, що базуються на квантовій хромодинаміці. До першої групи відносять потенціали Неймегенської та Аргоннської груп.

Точний та аналітичний розв'язок задачі розсіяння із метою обчислення фаз розсіяння можливий тільки для окремих феноменологічних потенціалів. Коли використовуються реалістичні потенціали, то фази розсіяння обчислюються наближено. Основними методами розв'язування рівняння Шредінгера з метою отримання фаз розсіяння є: метод послідовних наближень, Борнівське наближення, метод фазових функцій (МФФ), Brysk-апроксимація та ін. Саме МФФ виявився досить зручним при розв'язуванні багатьох конкретних задач атомної і ядерної фізики. Основною і головною перевагою МФФ при застосуванні до задач  $NN$ -розсіяння є та, що він дозволяє отримати фази розсіяння, не знаходячи при цьому хвильові функції як розв'язки рівняння Шредінгера. Завдяки фазовому рівнянню наявний безпосередній зв'язок між фазою розсіяння і потенціалом взаємодії.

До нерозв'язаних проблем в  $NN$ -взаємодії відносять наступні: надлишковий вузол хвильової функції дейтрона для деяких потенціалів; енергетичні поведінки поляризаційного параметра асиметрії  $A_y$  (так звана  $A_y$ -загадка), дейтронних аналізуючих здатностей та диференціального перерізу для пружного нуклон-дейтронного розсіяння; кутова й імпульсна залежність тензорної поляризації  $t_{20}$  та ін. (п. 1.3).

Як показує аналіз тематик публікацій в наукометричних базах за останні десятиліття, окрім взаємодії двох нуклонів між собою, цікавими є і процеси за безпосередньої участі дейтрона. Слід зауважити, що зв'язаним станом нейтрона і протона є саме дейтрон, який описується хвильовою функцією. Знання форми та особливостей поведінки хвильової функції дейтрона (ХФД) в координатному та/або імпульсному представленнях дозволяють описати процеси взаємодії пружного та непружного розсіяння дейтрона. Такими процесами є електрон-дейтронне, дейтрон-протонне розсіяння, реакції типу  $A(d,d')X$  на легких ядрах. Теоретична оцінка поляризаційних спостережуваних для вказаних процесів дозволяє оцінити межі застосовності моделей і їх узгодження з експериментом. Згідно аналізу п. 4.3 в науковій літературі відсутні експериментальні дані для дейтронних тензорних  $t_{21}$ ,  $t_{22}$  і векторних  $t_{10}$ ,  $t_{11}$  поляризацій в широкому інтервалі імпульсів. Тому є актуальними і теоретична оцінка, і експериментальне визначення даних величин.

Ще в роботах Ф. Капа і В. Гребнера (1955 р.), Парижської групи (1981 р.), С.Б. Дубовіченко (2000 р.) та ін. було запропоновано аналітичні форми ХФД в координатному представленні (пп. 3.2 і 3.7). Саме такі прості та зручні форми представлення ХФД дозволяють спростити чисельні розрахунки в прикладних задачах. В подальшому ці ідеї для апроксимації ХФД буде використано в дисертації.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами.** Дослідження, що представлені в дисертаційній роботі, були проведені в рамках науково-дослідницьких державних бюджетних тем ДВНЗ «Ужгородського національного універ-

ситету»: 1) ДБ-715 «Експериментальне і теоретичне дослідження взаємодії електронів і фотонів з ядрами в області енергій до 25 МеВ», номер державної реєстрації НДР: 0109U000873, в 2009-2011 рр.; 2) ДБ-846 «Експериментальні та теоретичні проблеми взаємодії електронів та гамма квантів з молекулами, атомами та атомними ядрами», номер державної реєстрації НДР: 0115U001098, в 2015-2017 рр.; 3) ДБ-880 «Теорія R-матриці і точні чисельні розрахунки елементарних процесів зіткнення електронів і фотонів зі складними атомами», номер державної реєстрації НДР: 0118U000173, в 2018-2020 рр.

**Мета і завдання дослідження.** Мета дисертаційної роботи здобувача – це вивчення нуклон-нуклонного розсіяння та дослідження впливу форми ХФД в координатному представленні на розрахунки поляризаційних характеристик процесів за участю дейтрона. Для досягнення мети дослідження необхідно вирішити такі завдання:

- по методу фазових функцій знайти фазові зсуви одно- і двоканального розсіяння нуклонів і застосувати їх для оцінки повного перерізу, парціальної амплітуди і повної (скалярної) парціальної амплітуди нуклон-нуклонного розсіяння;
- врахування форми зв'язуючого (тензорного) потенціалу в задачі на зв'язані канали та оцінка її впливу на асимптотику ХФД в координатному представленні;
- знайти аналітичні форми ХФД, які були б зручними при їх подальшому практичному застосуванні в чисельних розрахунках;
- застосування одержаних ХФД для розрахунків поляризаційних характеристик в процесах за участю дейтрона (електрон-дейтронному розсіянні, дейтрон-протонному розсіянні,  $A(d,d')X$ - реакції);
- виявлення закономірностей застосовності різних ХФД та конкретних нуклон-нуклонних моделей при оцінці поляризаційних спостережуваних в процесах за участю дейтрона.

**Об'єкт дослідження:** нуклон-нуклонний потенціал; дейтрон як зв'язаний стан нейтрона і протона.

**Предмет дослідження:** одно- та двоканальне нуклон-нуклонне розсіяння при енергіях до 350 МеВ; хвильова функція дейтрона в координатному представленні; електромагнітна структура дейтрона та його взаємодія з легкими ядрами; поляризаційні спостережувані в процесах за участю дейтрона.

**Методи дослідження.** Дисертаційне дослідження проводилося за допомогою як аналітичних, так і чисельних методів. Для пошуку фазових зсувів нуклон-нуклонного розсіяння використано метод фазових функцій. Для знаходження коефіцієнтів хвильової функції дейтрона в координатному представленні застосовано апроксимацію базисом  $r^n \cdot A_i \cdot \exp(-a_i \cdot r^m)$ , а для оцінки співвідношення  $B/A$  – паде-апроксимацію. Для чисельного інтегрування використовувалися методи Рунге-Кутта 4- і 5-го порядків точності. Значна частина програмного коду була реалізована на мові програмування Фортран.

#### **Наукова новизна отриманих результатів.**

1. В рамках потенціальної моделі вперше застосовано асимптотику для ХФД в координатному представленні, яка залежить від тензорного потенціалу. Виявлено, що вибір хибної асимптотики радіальних каналних функцій може генерувати надлишкові вузли ХФД.

2. Використовуючи метод фазових функцій, знайдено фазові зсуви для потенціалів Argonne v18, Nijm I, Nijm II, Nijm93, Reid93, які застосовано для розрахунку перерізу та скалярної амплітуди одноканального  $NN$ - розсіяння.

3. Отримано коефіцієнти для квадратичної функції параболічного типу Долгополова–Мініна–Работкіна, що описує фазові зсуви  $np$ - розсіяння до 350 MeV для потенціалів Argonne v18, Nijm I, Nijm II, Nijm93, Reid93, OSBEP, Idaho-A, CD-Vonn, WJC-2, N<sup>3</sup>LO та модельних потенціалів бази даних Granada-2013.

4. Запропоновано нові аналітичні форми ХФД в координатному представленні, які не містять надлишкових вузлів біля початку координат. Зазначено, що розрахунки величини розподілу густини дейтрона  $\rho_d^{M_d}$  і густини переходу  $\rho_r^{\pm 1}$  для різних ХФД допомагають оцінити коректність вибору аналітичної форми при апроксимації ХФД.

5. Знайдено вирази для сферичних  $S_0^{(i)}$  і квадрупольних  $S_2^{(i)}$  формфакторів через коефіцієнти розкладу аналітичних форм ХФД в координатному представленні. При застосуванні оригінального дипольного наближення для нуклонних формфакторів це в свою чергу дає змогу визначити асимптотики при великих значеннях імпульсу та спростити розрахунок таких характеристик як дейтронні формфактори  $G_C$ ,  $G_Q$ ,  $G_M$  та функція електричної структури  $A(p)$ . Запропоновано нову апроксимаційну форму експериментальних даних відношення структурних функцій  $B/A$  для імпульсів  $p < 7.5 \text{ fm}^{-1}$  при врахуванні відношень для зарядового  $G_C$  (квадрупольного  $G_Q$ ) і магнітного  $G_M$  формфакторів дейтрона.

**Практичне значення отриманих результатів.** Отриману в рамках потенціальної моделі ХФД без надлишкових вузлів для потенціалів Юкави, Reid93 і Argonne v18 можна в подальшому можна застосовувати для задач, що чутливі до асимптотики ХФД в координатному представленні.

Отримані коефіцієнти для квадратичної функції параболічного типу, що описує фазові зсуви  $np$ - розсіяння, для широкого кола потенціалів можуть бути використані для розрахунку фази розсіяння в будь-якій точці енергетичного інтервалу 1–350 MeV.

Табличні значення коефіцієнтів ХФД в координатному представленні для п'яти потенціалів Аргоннської та Неймегенської груп можуть бути використані для чисельних розрахунків величин, які визначаються по ХФД.

Одержані теоретичні результати для поляризаційних спостережуваних у процесах за участю дейтрона слугують прогнозуванням для їх експериментального визначення.

На підставі результатів в дисертаційному дослідженні для поляризаційних характеристик можна отримати певну інформацію про електромагнітну структуру дейтрона і диференціальний переріз подвійного розсіяння. Використовуючи обчислені дейтронні поляризації  $t_{ij}(p)$ , при відомих тензорній і векторній аналізуючих здатностях можна більш детально вивчити явище поляризації розсіяних назад електронів і дейтронів.

**Особистий внесок здобувача.** Під керівництвом доц., к.ф.-м.н. Гайсака Івана Івановича дисертант приймав активну участь на всіх етапах наукового дослідження (у постановці завдань, при виборі методів дослідження, розробці чисельних програм на мові програмування Фортран, здійсненні чисельних розрахунків, аналізі результатів та формулюванні висновків). Частина робіт виконані у співавторстві з науковим керівником. Особистий внесок дисертанта полягає у наступному. В роботі [16] здобувач приймав участь у чисельних розрахунках та в інтерпретації одержаних

результатів. В [17] дисертант розраховував параметри дейтрона.

В публікаціях [38-46], які засвідчують апробацію матеріалів дисертації, здобувач приймав таку участь: чисельні розрахунки, обговорення та інтерпретація результатів, написання тез й доповіді для виступу на конференції, доповідь.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертації доповідалися і були представлені в доповідях та матеріалах таких міжнародних та вітчизняних конференцій: Міжнародна конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики «ЕВРИКА» (Львів, 2008 р.); 13th Small Triangle Meeting on Theoretical Physics (Stará Lesna, Slovakia, 2011 р.); Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України (Київ, 2012, 2013, 2016, 2017 рр.); Конференція по фізиці високих енергій, ядерній фізиці і прискорювачам (Харків, ННЦ ХФТІ, 2008, 2012, 2014 рр.); VI International Conference “Analysis and Mathematical Physics” (Харків, 2018 р.); Міжнародна конференція молодих учених і аспірантів “ІЕФ” (Ужгород, 2007, 2011, 2017 рр.); Науково-технічна конференція «Фізика, електроніка, електротехніка» (Суми, 2015, 2019 рр.); Інформаційні технології: V Всеукраїнська науково-практична конференція молодих науковців (Київ, 2018 р.). Отримані результати дисертаційного дослідження також доповідалися і обговорювалися на щорічних стендових конференціях науково-педагогічних працівників ДВНЗ «УжНУ».

**Публікації.** Основний зміст дисертації опублікований в 37 наукових статтях в реферованих журналах [1-37]. Із них: 6 в іноземних [1-6] та 9 у вітчизняних [7-15] журналах, що індексуються у наукометричних базах Scopus і Web of Science; 11 входять до переліку фахових видань України [16-26]; 11 в іноземних журналах [27-37], що не належать до наукометричних баз. Результати роботи також представлені в 15 тез доповідей у матеріалах конференцій [38-52] та в 3 електронних препринтах [53-55] на <http://arxiv.org/> (Cornell University Library).

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації – 243 сторінки. Основна частина роботи викладена на 165 сторінках і, окрім тексту і формул, містить 88 рисунків та 11 таблиць. В 10 додатках об’ємом 37 сторінок містяться список публікацій здобувача за темою дисертації, табличні значення й рисунки фізичних величин (24 таблиці і 22 рисунки), громіздкі викладки та довідкова інформація. Список використаних джерел налічує 506 найменування на 20 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

**У вступі** висвітлено актуальність теми дисертаційної роботи, коротко сформульовано мету, задачі, об’єкт та предмет дослідження, а також методи, що для цього використовувалися. Приведено перелік науково-дослідницьких тем, в рамках яких виконувалася дисертаційна робота. Представлено основні наукові результати, їх новизну, наукове та практичне значення, окремо відмічено особистий внесок здобувача. Крім цього, наведено список конференцій і семінарів, де проведена апробація отриманих результатів, та перелік публікацій за темою дисертації.

**У першому розділі** «Властивості ядерних сил і потенціали нуклон-нуклонної взаємодії» приведено детальний огляд основних груп широковживаних потенціалів  $NN$ - взаємодії. Зокрема описано феноменологічні потенціали, моделі бозонного обміну, потенціали в рамках ефективної теорії поля та моделі, що базуються на квантовій

хромодинаміці. Вкінці розділу приділена увага деяким нерозв'язаним проблемам в  $NN$ -взаємодії та їх стан вирішення (лишній вузол ХФД та енергетична поведінка поляризаційного параметра асиметрії  $A_y$ , дейтронних аналізуючих здатностей  $T_{20}$ ,  $iT_{11}$ ,  $T_{21}$ ,  $T_{22}$  та диференціального перерізу  $d\sigma/d\Omega$  для пружного нуклон-дейтронного розсіяння, кутова й імпульсна залежність тензорної поляризації  $t_{20}$  та ін.).

У другому розділі «Метод фазових функцій та розрахунки фазових зсувів  $NN$ -розсіяння» приділено увагу виводу й аналізу основних рівнянь МФФ [1\*] для їх застосування до задач одно- та двоканального розсіяння. Обґрунтовано вибір МФФ для отримання фаз одно- і двоканального розсіяння. Зазначено, що саме цей метод дозволяє застосовувати такі рівняння, що безпосередньо пов'язують фази й амплітуди розсіяння з  $NN$ - потенціалом, не шукаючи при цьому хвильові функції як розв'язки рівняння Шредінгера. В розділі вказано фізичний зміст фазової й амплітудної функцій, перераховано переваги МФФ. Для одноканального розсіяння проаналізовано асимптотику хвильової функції для слабо і сильно сингулярних потенціалів. Для двоканального розсіяння у загальній формі описано рівняння для асимптотики фазової функції.

Для одноканального випадку за допомогою МФФ чисельно отримано фазові зсуви  $NN$ - розсіяння для потенціалів Argonne v18, Nijm I, Nijm II, Nijm93, Reid93. По розрахованим фазовим зсувам обчислено повний переріз та скалярну амплітуду, значення яких мало відрізняються від величин, отриманих по відомим фазам в інших роботах. Порівнюються результати розрахунків фазових зсувів по МФФ з фазовими зсувами для інших потенціальних моделей і з експериментальними даними для фазового аналізу SP07.

Для групи потенціалів (Argonne v18, Nijm I, Nijm II, Nijm93, Reid93, OSBEP, Idaho-A, CD-Bonn, WJC-2, N<sup>3</sup>LO та модельних потенціалів бази даних Granada-2013) була проведена апроксимація фаз  $np$ - розсіяння за допомогою квадратичної функції параболічного типу Долгополова–Мініна–Работкіна [2\*]:  $y_i(x) = a + bx + cx^2$ . Причому для апроксимації фази для перших п'яти потенціалів розраховано по МФФ. На Рис. 1 приведені фазові зсуви  $np$ - розсіяння для  $^1S_0$ - і  $^3P_0$ - станів як результат апроксимації числових значень для восьми потенціалів (позначення як криві). Вони порівнюються з даними для фазового аналізу SP07 (точки).

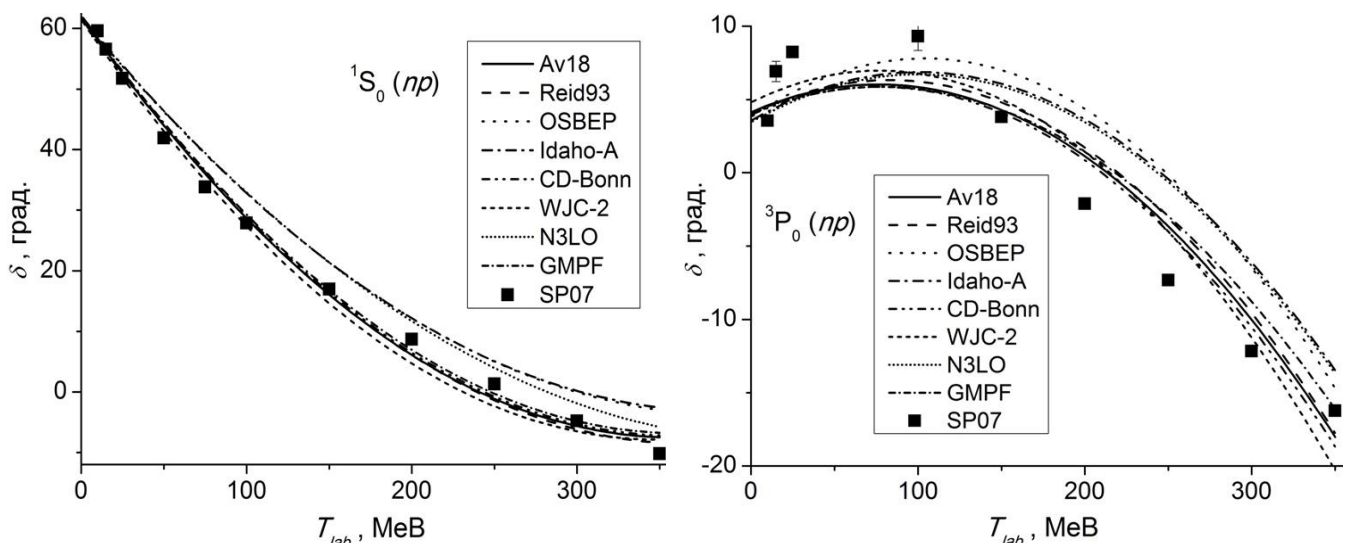


Рис. 1. Фазові зсуви  $np$ - розсіяння для  $^1S_0$ - і  $^3P_0$ - станів

Отримані коефіцієнти цієї апроксимаційної функції можуть бути застосовані для розрахунку фази розсіяння в будь-якій точці інтервалу енергій 1–350 MeV для цих потенціалів, а також для оцінки величин залежних від фази.

За допомогою параметризації Стаппа знайдено фази розсіяння і параметр змішування для зв'язаних каналів  ${}^3S_1$ – ${}^3D_1$ . Для потенціалу Reid68 розрахунки параметра змішування дають гладку поведінку від енергії як і в інших роботах.

Матеріали розділу 2 опубліковані в роботах [1, 2, 7, 8, 20, 22, 31, 33, 34, 53, 54].

**У третьому розділі** «Хвильова функція дейтрона» розглянуто систему зв'язаних рівнянь Шредінгера, яка описує дейтрон

$$\begin{cases} \frac{d^2 u}{dr^2} + (k^2 - U_C)u = \sqrt{8}U_T w, \\ \frac{d^2 w}{dr^2} + \left(k^2 - \frac{6}{r^2} - U_C + 2U_T + 3U_{LS}\right)w = \sqrt{8}U_T u, \end{cases} \quad (1)$$

де  $U_i(r) = 2\mu V_i(r)/\hbar^2$  – перенормовані центральна ( $C$ ), спин-орбітальна ( $LS$ ) і тензорна ( $T$ ) частини  $NN$ - потенціалу;  $k^2 = 2\mu|E|/\hbar^2$  – хвильове число;  $u(r)$  і  $w(r)$  – радіальні ХФД для станів з орбітальними моментами  $l=0$  і 2.

У рамках потенціальної моделі детально аналізується структура радіальної ХФД. Показано, що фізичний розв'язок крайової задачі можна побудувати із двох незалежних розв'язків зв'язаної системи рівнянь Шредінгера. Асимптотика цих розв'язків визначається повним моментом системи та поведінкою тензорного потенціалу біля початку координат. Наявність такої обумовленості асимптотики від форми тензорного потенціалу суттєво відрізняє задачу із зв'язаними каналами від задачі для одиночного рівняння Шредінгера. В роботі [16] знайдено чисельні розв'язки системи рівнянь (1) методом Рунге-Кутта 4-го порядку. При відладці програми на мові Фортран було допущено помилкові записи для коефіцієнтів асимптотики двох розв'язків, регулярних в нулі, що призвело до дуже швидкої осциляції радіальної хвильової функції  $u_2$  (Рис. 2). виправлення помилки дає «розумну» поведінку радіальної функції. Отже, вибір хибної (некоректної) асимптотики радіальних каналних функцій може генерувати надлишкові вузли в хвильовій функції.

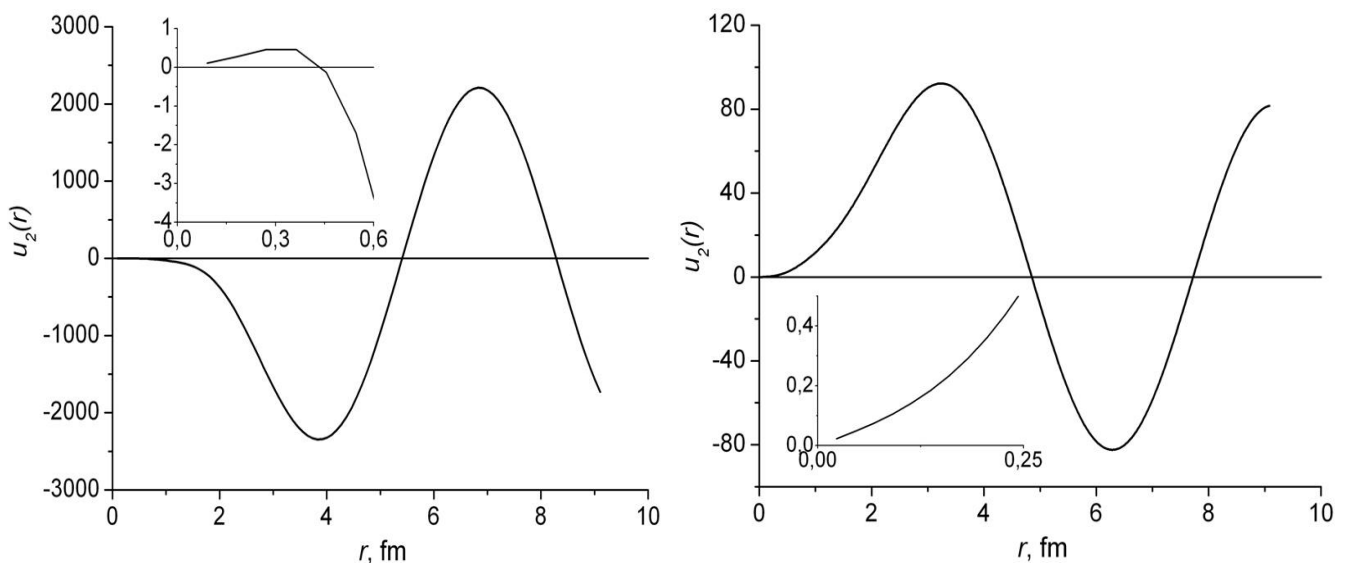


Рис. 2. ХФД з некоректними (зліва) і коректними (справа) крайовими умовами



Для трьох потенціалів (Юкави, Reid93 і Argonne v18) чисельно розраховані ХФД в координатному та імпульсному представленнях, які не містять надлишкових вузлів. ХФД в конфігураційному представленні для потенціалів Юкави і Reid93 приведено на Рис. 3. По отриманих хвильових функціях розраховано імпульсний розподіл нуклонів у дейтронах. Порівнюються отримані параметри дейтрона з раніше опублікованими.

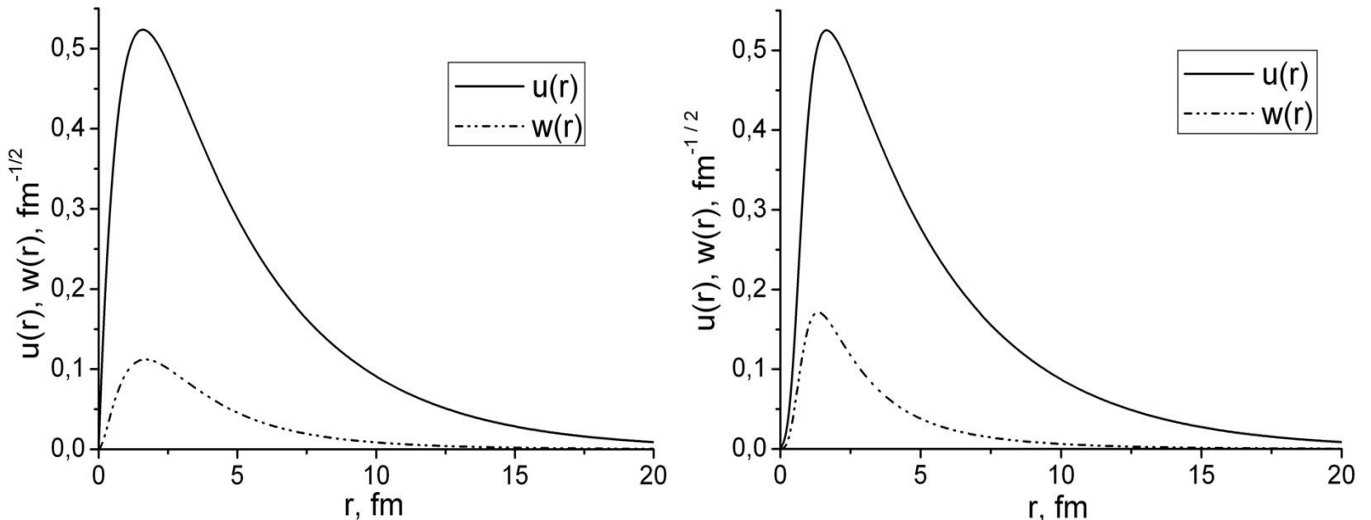


Рис. 3. ХФД для потенціалів Юкави (зліва) і Reid93 (справа)

Проаналізовано основні аналітичні форми ХФД в координатному та імпульсному представленнях. Вказано наявність та причини надлишкового вузла ХФД поблизу початку координат. Наявність вузлів у ХФД (основного і єдиного стану) свідчить про певні неузгодженості і неточності в реалізації чисельних алгоритмів в розв'язанні подібних задач, а також пов'язана з особливостями потенціальних моделей для опису дейтрона.

Приведено огляд основних статичних параметрів дейтрона, які визначаються по ХФД в координатному представленні. До них відносять: радіус, електричний квадрупольний момент, вклад  $D$ - стану, магнітний момент, асимптотика  $D/S$ - стану.

Для апроксимації ХФД в координатному представленні запропоновано дві нові аналітичні форми. Вони представлені у вигляді добутку степеневі функції  $r^n$  на суму експоненціальних членів  $A_i \cdot \exp(-a_i \cdot r^3)$  [3, 9, 18]. Чисельно розраховано коефіцієнти цих аналітичних форм ХФД для потенціалів Nijm I, Nijm II, Nijm93, Reid93, Argonne v18. По цим формам побудовано ХФД в координатному представленні, які не містять надлишкових вузлів. Розраховані статичні параметри дейтрона добре узгоджуються з експериментальними і теоретичними даними. Крім цього, використано елементарні гаусові розклади і функції Лагерра для апроксимації ХФД в координатному представленні. Дані способи одержання ХФД забезпечують коректну асимптотику поблизу початку координат.

При практичному виборі аналітичних форм ХФД необхідно в першу чергу перевіряти задовільність розрахованих по цим формам статичних параметрів дейтрона. При мінімізації величин  $\chi^2$  і  $\epsilon$  аналітична форма коректно описує ХФД в координатному представленні.

При використанні ХФД розраховано радіальні моменти дейтрона та інверсні моменти радіуса. Ці результати порівнюються з даними для інших потенціалів. Приведено характеристики процесів в теорії дифракції дейтрон-ядерної взаємодії.

Для отримання розподілу густини дейтрона застосовано ХФД в координатному представленні. Аналіз впливу відсутності чи наявності вузлів ХФД на поведінку величин розподілу густини в дейтроні  $\rho_d^{M_d}$  та густини переходу  $\rho_{tr}^{\pm 1}$  показує, що форма хвильових функцій впливає на форму цих величин. Розрахунки розподілу густини і густини переходу для різних ХФД можуть допомогти оцінити коректність вибору конкретної аналітичної форми для апроксимації ХФД.

Матеріали розділу 3 опубліковані в працях [3, 9-14, 16-19, 23, 29, 37-45, 47-52].

**У четвертому розділі** «Поляризаційні характеристики процесів за участю дейтрона» проаналізовано теоретичні принципи одержання формфакторів і структурних функцій дейтрона та їх експериментальні дані провідних колаборацій та оглядів. Теж аналізуються експериментальні дані дейтронних поляризацій в науковій літературі. Зауважено, що відсутні значення величин  $t_{21}$ ,  $t_{22}$ ,  $t_{10}$  і  $t_{11}$  в широкому інтервалі імпульсів. Тому є актуальними теоретичні й експериментальні дослідження з метою одержання цих величин.

По аналітичним формам ХФД в координатному представленні для потенціалів Nijm I, Nijm II, Nijm93, Reid93 і Argonne v18 розраховано зарядовий  $G_C$ , квадрупольний  $G_Q$  і магнітний  $G_M$  формфактори дейтрона. Для розрахунків використовується оригінальне дипольне наближення для нуклонних формфакторів. Порівнюються теоретичні розрахунки значень формфакторів дейтрона з їх експериментальними даними провідних колаборацій (Bates, BLAST, Bonn, JLab, Mainz, Naval Research Lab, NIKHEF, Orsay, Saclay, SLAC, Stanford, VEPP3 і VEPP4) та оглядів (Abbott, Boden, Garcon і Karpus). Було розраховано теоретичні значення для формфакторів  $G_Q(0)$  і  $G_M(0)$  при граничній умові для імпульсу при  $p^2=0$ . Зміна знаку формфакторів знаходиться в областях імпульсів при 4.5-4.8 fm<sup>-1</sup> для  $G_C$ ; при 12.7-14.6 fm<sup>-1</sup> для  $G_Q$ ; при 6.2-8.3, 7.9-8.4 та 11.6-13.8 fm<sup>-1</sup> для  $G_M$ . Розраховану позицію нуля формфакторів дейтрона  $p_0$  порівняно із значеннями для інших потенціальних моделей. При великих значеннях імпульсу асимптотики формфакторів дейтрона визначаються коефіцієнтами аналітичних форм ХФД, ізоскалярними нуклонними формфакторами та імпульсом.

Аналогічно до роботи М.Н. Платонової і В.І. Кукуліна [3\*] записано формули для сферичних  $S_0^{(i)}$  та квадрупольних  $S_2^{(i)}$  формфакторів, які виражаються через коефіцієнти розкладу вказаної ХФД в координатному представленні.

Теоретичні розрахунки структурних функцій  $A(p)$  і  $B(p)$  по аналітичним формам ХФД в координатному представленні для п'яти потенціалів порівнюються з експериментальними даними світових колаборацій: для функції електричної структури  $A$  – Stanford, Orsay, CEA, DESY, SLAC, Mainz, Bonn, Saclay, Bates, JLab, JLab2007; для функції магнітної структури  $B$  – Stanford, Orsay, Mainz, Bonn, Saclay, SLAC, Bates, JLab, JLab2007; також враховані дані із огляду Garcon. Для функції електричної структури  $A(p)$  продемонстровано основні теоретичні форми асимптотичної поведінки та апроксимації по експериментальним даним і порівняно їх з експериментом провідних колаборацій. Крім підходу в КХД, для розглянутих випадків асимптотика для  $A(p)$  представлена у формі степеневі функції  $p^{-n}$ .

Позиція нуля функції магнітної структури  $B(p)$  порівняна з розрахунками для інших потенціальних моделей. Кількість нулів для структурної функції  $B$  становить від одного до трьох. Отримано нові апроксимаційні форми експериментальних даних відношення  $B/A$  для

імпульсів  $p < 7.5 \text{ fm}^{-1}$ . Апроксимація відношення структурних функцій  $B/A$  здійснена за допомогою простої паде-апроксиманти, а також наближень при врахуванні відношень для зарядового  $G_C$  (квадрупольного  $G_Q$ ) і магнітного  $G_M$  формфакторів дейтрона:

$$\frac{B}{A}(\alpha; \beta_i; C_1, C_2) = \frac{\frac{4}{3}\eta(1+\eta)}{(C_1 p^\alpha)^2 + \frac{8}{9}\eta^2(C_2 p^{\beta_i})^2 + \frac{2}{3}\eta}. \quad (2)$$

Одночасне визначення всіх 4-ох параметрів в (2) чисельно неможливе, тому, задаючи значення  $\beta_i$ , можна визначити три інші. Приведено результати шести модельних розрахунків та відповідні значення коефіцієнтів для цих апроксимаційних формул. Отримані результати для структурних функцій та їх відношення  $B/A$  дозволять в подальшому більш детально досліджувати електромагнітні характеристики дейтрона, а також можуть бути використані для оцінки теоретичних значень спінових спостережуваних, які залежні від функцій електричної та магнітної структури.

На основі одержаних коефіцієнтів для форм ХФД для вказаних потенціалів представлено результати теоретичних розрахунків для векторних  $t_{10}$ ,  $t_{11}$  і тензорних  $t_{20}$ ,  $t_{21}$ ,  $t_{22}$  дейтронних поляризацій, які порівнюються із експериментальними даними провідних світових колаборацій (Bates, BLAST, JLab, NIKHEF, VEPP-3, Saclay) та оглядів (Boden, Garcon, Abbott). Знайдені значення позиції нуля тензорних поляризацій  $t_{20}$  і  $t_{21}$  порівняно із результатами для інших потенціальних моделей і апроксимацій. На Рис. 4 приведено тензорні поляризації  $t_{20}$  і  $t_{21}$  (при  $\theta=70^\circ$ ). При порівнянні отриманих теоретичних значень  $t_{20}$  з експериментальними даними спостерігається хороше узгодження для області значень імпульсів  $p=1-4 \text{ fm}^{-1}$ . До речі, наявний значний розкид експериментальних даних. На відміну від тензорної поляризації її векторна компонента  $t_{1i}$  менше досліджена експериментаторами. Наявні тільки дані колаборації BLAST. Розраховані значення поляризацій  $t_{1i}$  можуть слугувати певним теоретичним передбаченням для подальших експериментальних досліджень.

В діапазоні імпульсів до  $7 \text{ fm}^{-1}$  аналізується кутова асиметрія повного набору тензорної  $t_{2j}$  і векторної  $t_{1i}$  дейтронних поляризацій. Порівнюються величини асиметрії  $t_{ij}$

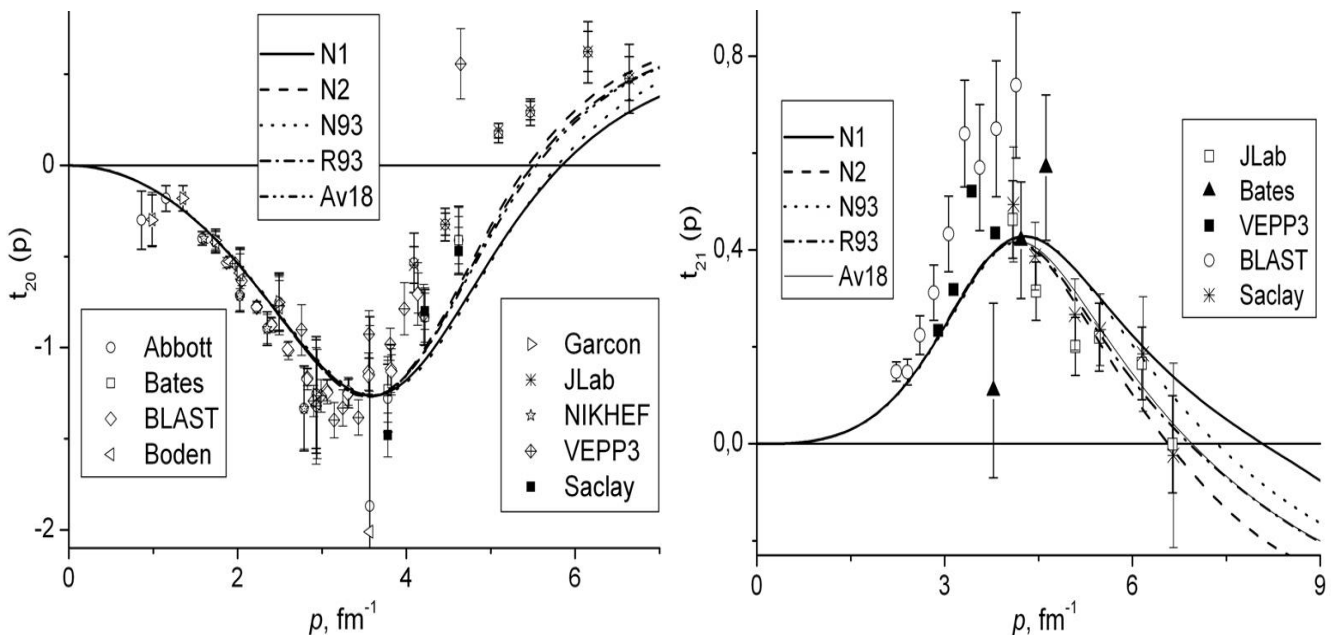


Рис. 4. Тензорні поляризації  $t_{20}$  і  $t_{21}$ . Експериментальні дані див. в огляді [14]

для ХФД потенціалів Nijm I, Nijm II, Nijm93, Reid93, Argonne v18, ОВЕРС, МТ і Paris. Імпульсно-кутова залежність значень векторних  $t_{1i}(p, \theta_e)$  та тензорних  $t_{2i}(p, \theta_e)$  поляризацій у 3D форматі при імпульсах до  $7 \text{ fm}^{-1}$  і кутах розсіяння 1-180 градусів була розрахована для потенціалу Reid93.

Компоненти для диференціального перерізу розглянуто з урахуванням поляризаційних ефектів при пружному електрон-дейтронному розсіянні. Ці характеристики аналізуються при куті розсіяння  $\theta_e=70^\circ$  і різних імпульсах. Імпульсно-кутова залежність значень компонент  $\tau_{2M}$  диференціального перерізу оцінена у 3D форматі при застосуванні ХФД в координатному представленні для потенціалу Reid93. Для компоненти  $\tau_{21}(p, \theta)$  характерний горб, а для компоненти  $\tau_{22}(p, \theta)$  присутня яма.

Порівняння дейтронних тензорних поляризацій  $t_{2i}$  і компонент  $\tau_{2M}$  диференціального перерізу в 3D форматі дозволять краще пояснити і проілюструвати закономірності пружного  $ed$ - розсіяння.

Застосовуючи нові аналітичні форми ХФД для потенціалів Reid93 і Argonne v18, представлено результати кутової асиметрії для векторних  $t_{10}$ ,  $t_{11}$  і тензорних  $t_{20}$ ,  $t_{21}$ ,  $t_{22}$  дейтронних поляризацій та імпульсної асиметрії для векторних  $t_{1i}$  дейтронних поляризацій. Досліджено вплив чотирьох апроксимацій ХФД (для потенціалу Reid93) на результати чисельних розрахунків тензорної поляризації  $t_{20}$ .

У рамках методу інваріантної амплітуди проведено розрахунок тензорної аналізуючої здатності  $T_{20}$  і поляризаційної передачі  $\kappa_0$ , які є спіновими спостережуваними в пружному  $dp$ - розсіянні назад. Наявне добре співпадання значень  $\kappa_0$  та кореляції  $\kappa_0$ - $T_{20}$  з експериментальними даними.

В широкому діапазоні імпульсів та кутів розсіяння  $\theta$  представлена імпульсна асиметрія тензорних аналізуючих здатностей  $T_{20}$  і  $T_{22}$ , які характеризують фотонародження негативного  $\pi$ - мезона в реакції  $\gamma(d, \pi^-)pp$ . Спостерігається симетрія величин  $T_{20}$  і  $T_{22}$  відносно кута  $90^\circ$ . Відношення  $R$  для векторної  $P_x$  і тензорної  $P_{xz}$  поляризацій характеризується кутовою асиметрією.

В рамках дослідження радіаційних поправок до поляризаційних спостережуваних в пружному  $ed$ - розсіянні в лептонних змінних розраховано Борнівські значення векторних  $A_B^L$ ,  $A_B^T$  та тензорних  $A_B^{LL}$ ,  $A_B^{TT}$ ,  $A_B^{LT}$  асиметрій. Для чисельних розрахунків векторних та тензорних асиметрій використано для восьми потенціалів: Nijm I, Nijm II, Nijm93, Reid93, Argonne v18, ОВЕРС, МТ і Paris. Аналіз імпульсно-кутової залежності векторних  $A_B^i(p, \theta)$  та тензорних  $A_B^{ij}(p, \theta)$  асиметрій у 3D форматі для потенціалу Reid93 показує, що для величин  $A_B^{LL}$  і  $A_B^{TT}$  спостерігається горб (пік) при  $3.5$ - $4 \text{ fm}^{-1}$  в інтервалі кутів  $0$ - $180^\circ$ , а  $A_B^{LT}$  навпаки наявна яма.

Отже, поряд з « $A_y$  загадкою» залишаються актуальними теоретичні та експериментальні дослідження інших поляризаційних характеристик для процесів за участю дейтрона, для яких наявна як кутова, так й імпульсна асиметрія.

Використання запропонованих простих та зручних нових аналітичних форм ХФД в координатному представленні дозволяють спростити чисельний розрахунок та аналіз спінових спостережуваних для  $dp$ - розсіяння, а також функцій електричної та магнітної структури, формфакторів дейтрона. Результати розрахунків тензорної і векторної дейтронних поляризацій дають певну інформацію про електромагнітну

структуру дейтрона і диференціальний переріз подвійного розсіяння. І за ними при відомих тензорній і векторній аналізуючих здатностях можна більш детально вивчити явище поляризації відбитих (розсіяних назад) електронів і дейтронів.

Застосовуючи отримані коефіцієнти для згаданих ХФД, розраховано величини поляризаційних характеристик дейтрона (компоненти тензора чутливості до поляризації дейтронів  $T_{20}$ , поляризаційної передачі  $k_0$ , тензорної аналізуючої здатності  $A_{yy}$ , тензор поляризованої мішені  $R_T-1$ , тензор асиметрії  $A_{zz}$  та ін.), які є співрозмірними з раніше опублікованими експериментальними даними і теоретичними значеннями.

По коефіцієнтам аналітичної форми ХФД в координатному представленні для потенціалів Nijm I, Nijm II, Nijm93, Reid93, Argonne v18 розраховано поляризаційні спостережувані в реакції типу  $A(d,d')X$ . Додатково порівнюються одержані результати з теоретичними оцінками для інших трьох потенціальних моделей (Paris, CD-Bonn, MT). Обчислені значення тензорної  $A_{yy}$  і векторної  $A_y$  аналізуючих здатностей порівнюються з експериментальними даними в  $t$ - масштабуванні для непружного розсіяння дейтронів на водні, вуглеці та берилію і даними процесів  $e^-+d \rightarrow e^-+d$  та  $p(d,d')X$ . Для теоретичного опису застосовано формалізм в моделях імпульсного наближення плоских хвиль (ІНПХ) та обміну  $\omega$ -мезоном. Теоретичні оцінки величин  $A_{yy}$  й  $A_y$  в ІНПХ (Рис. 5) порівнюються з експериментальними даними для  $A(d,d')X$ - реакції на легких ядрах.

В моделі ІНПХ також оцінені теоретичні значення тензор-тензорної  $K_{yy}$  та вектор-векторної  $K_y$  передач поляризації, а в підході обміну  $\omega$ -мезоном – векторні (тензорні) коефіцієнти передачі поляризації  $k_a^{a'}$  ( $k_{aa}^{a'a'}$ ). В рамках моделі обміну  $\omega$ -мезоном також приведені результати  $A_{yy}$  для Ропер- резонансу та алгебраїчної колективної моделі. Задовільність теоретичних оцінок аналізуючих здатностей їх експериментальним даним в різних областях  $t$ - масштабування детально проаналізовано в залежності від застосованої моделі опису  $A(d,d')X$ - реакції та вибору потенціальної моделі. В подальшому одержані значення  $A_{yy}$ ,  $K_{yy}$ ,  $K_y$  можуть бути застосовані для знаходження парціальних і спин-фліп перерізів, а також опису подвійного диференціального перерізу

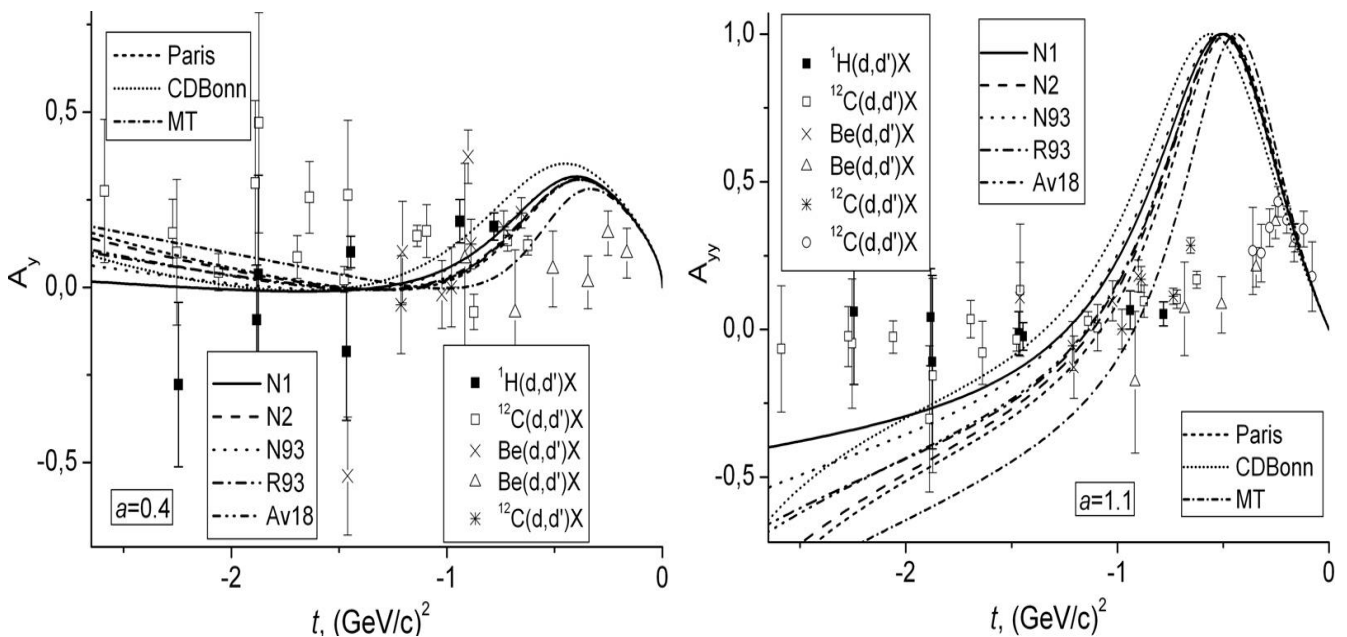


Рис. 5. Векторна  $A_y$  і тензорна  $A_{yy}$  аналізуючі здатності при  $a=0.4$  і  $1.1$  відповідно. Експериментальні дані див. в огляді [15]

для відомих спектрів енергії збудження в реакції  $^{12}\text{C}(d,d')$ .

В наближенні нульової маси лептона розглянуто лептон-дейтронне розсіяння. Імпульсно-кутова залежність значень коефіцієнтів спінової кореляції  $C_{xz}^{(0)}$ ,  $C_{zz}^{(0)}$  та тензорних асиметрій  $A_{xx}^{(0)}$ ,  $A_{xz}^{(0)}$ ,  $A_{zz}^{(0)}$  у 3D форматі оцінена по ХФД для потенціалу Reid93. Ці поляризаційні спостережувані аналізуються при різних енергіях і кутах розсіяння. Застосування отриманих величин дозволяє краще пояснити і проілюструвати закономірності пружного лептон-дейтронного розсіяння.

Матеріали розділу 4 опубліковані в роботах [3-6, 10-15, 17-19, 21, 24-28, 30, 32, 35, 36, 46, 55].

## ВИСНОВКИ

Основні результати досліджень, що виносяться на захист дисертації і викладені у ній, можна сформулювати наступним чином:

1. У рамках потенціальної моделі проведено детальний аналіз структури радіальної ХФД. Показано, що фізичний розв'язок крайової задачі можна побудувати із двох незалежних розв'язків зв'язаної системи рівнянь Шредінгера, асимптотика яких визначається повним моментом системи та характером поведінки тензорного потенціалу на початку координат. Наявність такої обумовленості асимптотики від виду тензорного потенціалу суттєво відрізняє задачу із зв'язаними каналами від задачі з одиночним рівнянням Шредінгера. Вибір хибної асимптотики радіальних каналних функцій може генерувати надлишкові вузли ХФД.

2. Враховуючи асимптотику поблизу початку координат, чисельно отримано ХФД. Потенціалами нуклон-нуклонної взаємодії слугували потенціал Юкави, несингулярний потенціал Рейда (Reid93), потенціал Argonne v18. Розраховані ХФД в конфігураційному представленні не містять надлишкових вузлів. По отриманих хвильових функціях розраховано імпульсний розподіл нуклонів у дейтроні.

3. Для одноканального випадку за допомогою методу фазових функцій чисельно отримано фазові зсуви нуклон-нуклонного розсіяння:  $nn$  ( $^1S_0$ -,  $^3P_0$ -,  $^3P_1$ -,  $^1D_2$ -,  $^3F_3$ - станів),  $pp$  ( $^1S_0$ -,  $^3P_0$ -,  $^3P_1$ -,  $^1D_2$ - станів) і  $np$  ( $^1S_0$ -,  $^1P_1$ -,  $^3P_0$ -,  $^3P_1$ -,  $^1D_2$ -,  $^3D_2$ - станів). Розрахунки проведено для потенціалів Неймегенської групи (Nijm I, Nijm II, Nijm93, Reid93) і потенціалу Argonne v18. По розрахованим фазовим зсувам обчислено повний переріз та скалярну амплітуду, значення яких мало відрізняються від величин, отриманих по відомих фазам в інших роботах. Порівнюються результати розрахунків фазових зсувів по МФФ з фазовими зсувами для інших потенціальних моделей і з експериментальними даними для фазового аналізу SP07.

4. Для ряду потенціалів (Argonne v18, Nijm I, Nijm II, Nijm93, Reid93, OSBER, Idaho-A, CD-Bonn, WJC-2, N<sup>3</sup>LO та модельних потенціалів бази даних Granada-2013) здійснена апроксимація фаз  $np$ - розсіяння аналітичним виразом. Апроксимаційною функцією слугувала квадратична функція параболічного типу. Отримані коефіцієнти даної залежності можуть бути застосовані для розрахунку фази розсіяння в будь-якій точці енергетичного інтервалу 1–350 MeV для вказаної групи потенціалів, а також оцінки величин залежних від фази.

5. Для пошуку фаз розсіяння і параметра змішування для зв'язаних каналів  $^3S_1$ – $^3D_1$  використано параметризацію Стаппа. Для чисельних розрахунків використано

найпростіший і наочний потенціал в координатному представленні – Reid68 (версія з м'якою серцевиною). Для параметра змішування  $\varepsilon_1$  розрахунки дають гладку поведінку від енергії (аналогічно до інших робіт).

6. Запропоновано дві нові аналітичні форми ХФД в координатному представленні у виді добутку степеневі функції  $r^n$  на суму експоненціальних членів  $A_i \cdot \exp(-a_i \cdot r^3)$ . Чисельно розраховані коефіцієнти цих форм для потенціалів Nijm I, Nijm II, Nijm93, Reid93, Argonne v18 забезпечують ХФД, які не містять надлишкових вузлів біля початку координат. Обчислені статичні параметри дейтрона добре узгоджуються з експериментальними даними і теоретичними результатами.

7. Аналогічно до роботи М.Н. Платонової і В.І. Кукуліна знайдено вирази для сферичних  $S_0^{(i)}$  і квадрупольних  $S_2^{(i)}$  формфакторів, які визначаються через коефіцієнти розкладу аналітичних форм ХФД в координатному представленні. Це в свою чергу дозволяє визначати асимптотики при великих значеннях імпульсу та спростити розрахунок дейтронних формфакторів  $G_C$ ,  $G_Q$ ,  $G_M$  та функції електричної структури  $A(p)$  при застосуванні оригінального дипольного наближення для нуклонних формфакторів.

8. Розраховані дейтронні формфактори  $G_C$ ,  $G_Q$ ,  $G_M$  та структурні функції  $A(p)$  і  $B(p)$  порівнюються з експериментальними даними світових колаборацій та оглядів. Позицію нуля формфакторів дейтрона і функції магнітної структури  $B(p)$  порівняно з близькими значеннями для інших потенціальних моделей. Запропонована нова апроксимаційна форма експериментальних даних відношення структурних функцій  $B/A$  для переданих імпульсів  $p < 7.5 \text{ fm}^{-1}$  враховує відношення для зарядового  $G_C$  (квадрупольного  $G_Q$ ) і магнітного  $G_M$  формфакторів дейтрона.

9. На основі одержаних аналітичних форм ХФД в координатному представленні розраховано сукупність поляризаційних характеристик:

для  $ed$ - розсіяння: векторні  $t_{10}$ ,  $t_{11}$  і тензорні  $t_{20}$ ,  $t_{21}$ ,  $t_{22}$  дейтронні поляризації та їх кутова й імпульсна асиметрії;

для  $dp$ - розсіяння: тензорна аналізуюча здатність  $T_{20}$  і поляризаційна передача  $\kappa_0$  (розрахунок проведено у рамках методу інваріантної амплітуди);

в реакції  $A(d,d')X$ : тензорна  $A_{yy}$  і векторна  $A_y$  аналізуючі здатності, тензор-тензорна  $K_{yy}$  та вектор-векторна  $K_y$  передачі поляризації, векторні (тензорні) коефіцієнти передачі поляризації  $k_a^{a'}$  ( $k_{aa}^{a'a'}$ ) (розрахунок проведено в моделях імпульсного наближення плоских хвиль та обміну  $\omega$ -мезоном);

в лептон-дейтронному розсіянні: коефіцієнти спінової кореляції  $C_{xz}^{(0)}$ ,  $C_{zz}^{(0)}$  та тензорні асиметрії  $A_{xx}^{(0)}$ ,  $A_{xz}^{(0)}$ ,  $A_{zz}^{(0)}$  (застосовано наближення нульової маси лептона).

10. Порівняння отриманих теоретичних значень зазначених поляризаційних характеристик з наявними в літературі експериментальними даними провідних колаборацій та оглядів показує:

1) Для тензорної  $t_{20}$  дейтронної поляризації для потенціалів Argonne v18, Nijm I, Nijm II, Nijm93, Reid93 наявне хороше узгодження в області значень імпульсів  $p=1-4 \text{ fm}^{-1}$ . Дейтронні поляризації  $t_{10}$ ,  $t_{11}$ ,  $t_{21}$ ,  $t_{22}$  можуть бути взяті до уваги при теоретичних оцінках для інших потенціалів чи при їх експериментальному визначенні, оскільки для цих величин відсутні експериментальні дані в широкому інтервалі імпульсів.

2) В ІНПХ: величина  $A_{yy}$  в ІНПХ добре узгоджується з експериментальними даними до  $|t|=0.2 \text{ (GeV/c)}^2$  і в середині інтервалу  $0.8-1.9 \text{ (GeV/c)}^2$ ; чим менший

параметр  $a$ , тим буде ближче змодельована крива  $A_y$  до експерименту; для  $A_y$  найбільш чутливим до  $a$  буде CD-Vonn потенціал, а менш чутливим – МТ модель.

3) В моделі обміну  $\omega$ -мезоном: значення  $A_{yy}$  слабо відрізняються від вибору потенціалів при малих імпульсах до  $0.2 \text{ (GeV/c)}^2$ , а для  $p > 2.2 \text{ (GeV/c)}^2$  наявні близькі значення  $A_{yy}$  для різних потенціалів при параметрі  $\rho = 0.5$  і їх різка відмінність при  $\rho = 0.1$ ; в максимумі при  $\sim 0.45 \text{ (GeV/c)}^2$  величина  $A_y$  дає кращий опис експериментальних даних  $A(d,d')X$ - реакції при  $\rho = 0.1$ .

### СПИСОК ЦИТОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- 1\*. Баби́ков В.В. Метод фазовых функций в квантовой механике. М.: Наука, 1988. 256 с.
- 2\*. Dolgoplov M.A., Minin L.A., Rabotkin V.A. Approximation Properties of the Paris Potential of Nucleon-Nucleon Interaction. *Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys.* 2017. Vol. 81, No. 10. P. 1225–1229.
- 3\*. Platonova M.N., Kukulin V.I. Refined Glauber model versus Faddeev calculations and experimental data for  $pd$  spin observables. *Phys. Rev. C.* 2010. Vol. 81, Iss. 1. P. 014004.

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*

*Публікації, які ввійшли до міжнародних наукометричних баз:*

1. Zhaba V. I. The phase-functions method and full cross-section of nucleon-nucleon scattering. *Mod. Phys. Lett. A.* 2016. Vol. 31, No. 8. P. 1650049. DOI:10.1142/S0217732316500498.
2. Zhaba V. I. The phase-functions method and scalar amplitude of nucleon-nucleon scattering. *Int. J. Mod. Phys. E.* 2016. Vol. 25, No. 11. P. 1650088. DOI:10.1142/S0218301316500889.
3. Zhaba V. I. New analytical forms of wave function in coordinate space and tensor polarization of deuteron. *Mod. Phys. Lett. A.* 2016. Vol. 31, No. 25. P. 1650139. DOI:10.1142/S021773231650139X.
4. Zhaba V. I. Analytical forms of the deuteron wave function for Nijmegen group potentials and polarization characteristics of  $A(d,d')X$  reactions. *Mod. Phys. Lett. A.* 2018. Vol. 33, No. 27. P. 1850160. DOI:10.1142/S0217732318501602.
5. Zhaba V. I. Deuteron wave function for Reid93 potential and polarization observables in elastic lepton-deuteron scattering. *Int. J. Mod. Phys. E.* 2019. Vol. 28, No. 9. P. 1950080. DOI:10.1142/S0218301319500800.
6. Zhaba V. I. Asymptotic of the electric structure function and the deuteron wave function. *Mod. Phys. Lett. A.* 2020. Vol. 35, No. 16. P. 2050134. DOI:10.1142/S0217732320501345.
7. Жаба В. І. Розрахунок фаз нуклон-нуклонного розсіяння для потенціалів NijmI, NijmII і Nijm93 за методом фазових функцій. *Журнал фізичних досліджень.* 2015. Т.19, №4. С. 4201.
8. Zhaba V. I. Calculation of phases of  $np$ -scattering up to  $T_{\text{lab}} = 3 \text{ GeV}$  for Reid68 and Reid93 potentials on the phase-function method. *Problems of Atomic Science and Technology.* 2016. №5(105). P. 29-32.
9. Жаба В. І. Нові аналітичні форми хвильової функції дейтрона для потенціалів Неймегенської групи. *Ядерна фізика та енергетика.* 2016. Т. 17, № 1. С. 22-26. DOI:10.15407/j8.01.022.
10. Жаба В. І. Апроксимація хвильової функції та поляризаційні характеристики дейтрона для потенціалів Неймегенської групи. *Український фізичний журнал.* 2016.



Т. 61, № 11. С. 949-955. DOI:10.15407/ujre61.11.0943.

11. Жаба В. І. Аналітичні форми хвильової функції в координатному представленні і тензорна поляризація дейтрона для потенціалів Неймегенської групи. *Журнал фізичних досліджень*. 2016. Т. 20, № 3. С. 3101.

12. Zhaba V. I. Approximation of the deuteron wave functions and polarizing characteristics for Reid93 potential. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2016. №3(103). P. 154-157.

13. Zhaba V. I. New Analytical Forms Through Laguerre Functions for Wave Function in Coordinate Space and Tensor Polarization of Deuteron. *Electr. Journ. Theor. Phys.* 2016. Vol. 13, No. 36. P. 147-156. DOI:10.4399/978885489952013.

14. Жаба В. І. Аналітичні форми хвильової функції й асиметрія поляризаційних характеристик дейтрона. *Журнал фізичних досліджень*. 2017. Т. 21, № 4. С. 4101.

15. Жаба В. І. Хвильова функція дейтрона й поляризаційні характеристики в  $A(d,d')X$ - реакції. *Журнал фізичних досліджень*. 2019. Т. 23, № 1. С. 1102. DOI:10.30970/jps.23.1102.

*Публікації у наукових фахових виданнях України:*

16. Гайсак І., Жаба В. Про вузли хвильової функції дейтрона. *Вісник Львівського університету. Серія фізична*. 2009, Вип. 44. С. 8-15.

17. Гайсак І. І., Жаба В. І. Дейтрон: хвильова функція і параметри. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Фізика*. 2014. № 36. С. 100-106. DOI:10.24144/2415-8038.2014.36.100-106.

18. Жаба В. І. Нові аналітичні форми хвильової функції і поляризаційні характеристики дейтрона для потенціалу Reid93. *Вісник Черкаського університету. Серія Фізико-математичні науки*. 2015. Том. 349, № 16. С. 50-55.

19. Жаба В. І. Апроксимація хвильової функції та поляризаційні характеристики дейтрона для потенціалу Argonne v18. *Вісник Львівського університету. Серія фізична*. 2016. Вип. 51. С. 77-86.

20. Жаба В. І. Розрахунок фаз нуклон-нуклонного розсіяння для потенціалу Reid93 за методом фазових функцій. *Наукові записки НаУКМА. Фізико-математичні науки*. 2016. Т. 178. Р. 44-48.

21. Жаба В. І. Нові аналітичні форми хвильової функції дейтрона для потенціалу Reid93. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Фізика*. 2016. № 39. С. 82-87. DOI:10.24144/2415-8038.2016.39.82-87.

22. Жаба В. І. Асимптотики фазової та хвильової функцій. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Фізика*. 2016. № 40. С. 106-112. DOI:10.24144/2415-8038.2016.40.106-112.

23. Жаба В. І. Дейтрон: аналітичні форми хвильової функції та розподіл густини. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Фізика*. 2017. № 42. С. 191-195. DOI:10.24144/2415-8038.2017.42.191-195.

24. Жаба В. І. Структурні функції дейтрона. *Вісник Львівського університету. Серія фізична*. 2017. Вип. 54. С. 22-32.

25. Жаба В. І. Аналітичні форми хвильової функції дейтрона і поляризаційні спостережувані в  $A(d,d')X$ - реакціях. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Фізика*. 2018. № 43. С. 34-40. DOI:10.24144/2415-8038.2018.43.34-40.

26. Жаба В. І. Розрахунки формфакторів дейтрона. *Вісник Львівського університету. Серія фізична*. 2019. Вип. 56. С. 43-55. DOI:10.30970/vph.56.2019.43.

*Публікації у іноземних журналах, що не належать до наукометричних баз:*

27. Zhaba V. I. Parameterization of the deuteron wave functions and form factors. *World Scientific News*. 2017. Vol. 87. P. 222-232.
28. Zhaba V. I. Parameterization of the Deuteron form Factors and the Tensor Polarizations. *International Journal of Advanced Research in Physical Science (IJARPS)*. 2017. Vol. 4, Iss. 10. P. 12-22.
29. Zhaba V. I. Analytical forms of deuteron wave function and density distribution. *World Scientific News*. 2018. Vol. 98. P. 206-213.
30. Zhaba V. I. Analytical Forms of the Deuteron Wave Function for Argonne V18 Potential and the Asymmetry for Polarization Characteristics of the Deuteron. *International Journal of Advanced Research in Physical Science (IJARPS)*. 2018. Vol. 5, Iss. 4. P. 5-9.
31. Zhaba V. I. Approximation of scattering phases for Reid93 potential. *International Journal of Advanced Research in Physical Science (IJARPS)*. 2018. Vol. 5, Iss. 8. P. 1-6.
32. Zhaba V. I. The vector and tensor asymmetries and deuteron wave function for different nucleon-nucleon potentials. *World Scientific News*. 2018. Vol. 114. P. 230-240.
33. Zhaba V. I. The variable phase approach: phase, amplitude and wave functions of the states for np- system for Argonne v18 potential. *World Scientific News*. 2019. Vol. 123. P. 161-180.
34. Zhaba V. I. Stapp parameterization and scattering phases for coupled states. *World Scientific News*. 2019. Vol. 129. P. 255-262.
35. Zhaba V. I. Analytical forms of the deuteron wave function in coordinate space and deuteron form factors. *World Scientific News*. 2019. Vol. 130. P. 250-264.
36. Zhaba V. I. Components for differential cross-section with taking into account the polarization effects in elastic electron-deuteron scattering. *World Scientific News*. 2019. Vol. 131. P. 279-286.
37. Zhaba V. I. Wave function and radial moments for the deuteron. *International Journal of Advanced Research in Physical Science (IJARPS)*. 2019. Vol. 6, Iss. 7. P. 18-22.

***Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:***

38. Гайсак І. І., Жаба В. І., Урбан Й., Халупка С. Двоканальне протон-нейтронне розсіювання. *Конференція молодих учених і аспірантів "ІЕФ-2007"*: програма і тези доповідей (м. Ужгород, 14-19 травня 2007 р.). Ужгород, 2007. С. 94.
39. Гайсак І., Жаба В. Про вузли хвильової функції дейтрона. *Міжнародна конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики «ЕВРИКА-2008»*: збірник тез (м. Львів, 19–21 травня 2008 р.). Львів, 2008. С. А6.
40. Гайсак І. І., Жаба В. І., Урбан Й., Халупка С. Асимптотика и ложные узлы волновой функции дейтрона. *VI конференция по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям: тезисы докладов* (г. Харьков, 25-29 февраля 2008 г.). Харьков, 2008. С. 56.
41. Гайсак І. І., Жаба В. І. Хвильова функція дейтрона в імпульсному представленні. *Міжнародна конференція молодих учених і аспірантів "ІЕФ-2011"*: програма і тези доповідей (м. Ужгород, 24-27 травня 2011 р.). Ужгород, 2011. С. 169.
42. Гайсак І. І., Жаба В. І. Связанные каналы и свойства волновой функции дейтрона. *X конференция по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям: тезисы докладов* (г. Харьков, 27 февраля – 2 марта 2012 г.). Харьков, 2012. С. 40.
43. Гайсак І. І., Жаба В. І., Балог Р. Й. Зв'язані канали і структура хвильової функції дейтрону. *XIX щорічна наукової конференції Інституту ядерних досліджень НАН України*: тези доповідей (м. Київ, 24-27 січня 2012 р.). Київ, 2012. С. 23.

44. Гайсак І. І., Жаба В. І. Хвильова функція і параметри дейтрона. *XX щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України: тези доповідей* (м. Київ, 28 січня – 1 лютого 2013 р.). Київ, 2013. С. 28-29.
45. Гайсак І. І., Жаба В. І. Хвильова функція дейтрона та імпульсний розподіл нуклонів у дейтроні. *XII конференція по фізиці високих енергій, ядерної фізики і ускорителям: тези доповідей* (г. Харків, 17-21 марта 2014 г.). Харків, 2014. С. 43.
46. Гайсак І. І., Жаба В. І. Хвильова функція і поляризаційні параметри дейтрона. *Науково-технічна конференція “Фізика, електроніка, електротехніка :: 2015” (ФЕЕ-2015): матеріали та програма* (м. Суми, 20-25 квітня 2015 р.). Суми, 2015. С. 57.
47. Жаба В. І. Апроксимація хвильової функції в координатному представленні і радіальні моменти дейтрона. *XXIII щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України: тези доповідей* (м. Київ, 01-05 лютого 2016 р.). Київ, 2016. С. 28-29.
48. Жаба В. І. Аналітичні форми хвильової функції дейтрона і дифракція дейтрон-ядерної взаємодії. *XXIV щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України: тези доповідей* (м. Київ, 10-13 квітня 2017 р.). Київ, 2017. С. 28-29.
49. Жаба В. І. Аналітичні форми хвильової функції дейтрона. *Міжнародна конференція молодих учених і аспірантів “ІЕФ-2017”*: матеріали конференції (м. Ужгород, 23-26 травня 2017 р.). Ужгород, 2017. С. 133-134.
50. Жаба В. І. Оцінка точності апроксимації хвильової функції дейтрона. *Інформаційні технології – 2018: зб. тез V Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих науковців* (м. Київ, 17 травня 2018 р.). Київ, 2018. С. 222-224.
51. Zhaba Viktor. Analytical forms of deuteron wave function for potentials Nijmegen group and density distribution. *VI International Conference “Analysis and Mathematical Physics” dedicated to the centennial anniversary of the National Academy of Sciences of Ukraine and the 50th anniversary of the Department of Function Theory: Book of abstracts* (Kharkiv, June 18-22, 2018). Kharkiv, 2018. P. 34-35.
52. Жаба В. І. Залежність асимптотики нормування S- стану хвильової функції від радіуса дейтрона. *Науково-технічна конференція “Фізика, електроніка, електротехніка :: 2019” (ФЕЕ-2019): матеріали та програма* (м. Суми, 23-26 квітня 2019 р.) Суми, 2019. С. 31-32.
- Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:**
53. Zhaba V. I. Calculation of phases of  $np$ - scattering for potentials Reid93 and Argonne v18 on the phase-function method. preprint arXiv: 1603.05382 [physics, nucl-th] (2016).
54. Zhaba V. I. Calculation of phases of  $np$ - scattering up to  $T_{lab}=3$  GeV for potentials Argonne group on the phase-function method. preprint arXiv: 1604.01058 [physics, nucl-th] (2016).
55. Zhaba V. I. Asymmetry for tensor  $t_{2j}$  and vector  $t_{1i}$  polarizations with taking into account the deuteron wave function in coordinate space. preprint arXiv: 1907.09853 [physics, nucl-th] (2019).

## АНОТАЦІЯ

**Жаба В.І. Хвильова функція і поляризаційні характеристики процесів за участю дейтрона. – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук (доктора філософії) за спеціальністю 01.04.16 «Фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій». – Інститут ядерних досліджень Національної академії наук України, Київ, 2021.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню нуклон-нуклонного розсіяння та аналізу впливу форми хвильової функції дейтрона в координатному представленні на розрахунки поляризаційних характеристик процесів за участю дейтрона.

У рамках потенціальної моделі проведено детальний аналіз структури радіальної хвильової функції дейтрона, асимптотика якої визначається повним моментом системи та характером поведінки тензорного потенціалу на початку координат. Зауважено, що вибір хибної (некоректної) асимптотики радіальних канальних функцій може генерувати надлишкові вузли хвильової функції.

У дисертації представлено огляд результатів застосування методу фазових функцій для пошуку фазових зсувів одно- та двоканального розсіяння. Для ряду потенціалів здійснена апроксимація фаз *np*- розсіяння добре відомою квадратичною функцією параболічного типу Долгополова–Мініна–Работкіна.

Запропоновано дві нові аналітичні форми хвильової функції дейтрона в координатному представленні для потенціалів Nijm I, Nijm II, Nijm93, Reid93, Argonne v18 у виді добутку степеневі функції  $r^n$  на суму експоненціальних членів  $A_i \cdot \exp(-a_i \cdot r^3)$ , які не містять надлишкових вузлів біля початку координат. На основі цих та інших форм проведено розрахунки та аналіз асимптотик формфакторів дейтрона і його структурних функцій, а також поляризаційних спостережуваних в електрон-дейтронному і дейтрон-протонному розсіянні,  $A(d,d')X$ - реакції. Задовільність теоретичних оцінок аналізуючих здатностей їх наявним експериментальним даним в різних областях  $t$ - масштабування проаналізовано в залежності від застосованої моделі опису  $A(d,d')X$ - реакції та вибору потенціальної моделі.

Одержані результати дейтронних поляризацій  $t_{10}$ ,  $t_{11}$ ,  $t_{21}$ ,  $t_{22}$  для *ed*- розсіяння, тензорної аналізуючої здатності  $T_{20}$  і поляризаційної передачі  $\kappa_0$  для *dp*- розсіяння, тензорної  $A_{yy}$  і векторної  $A_y$  аналізуючих здатностей, тензор-тензорної  $K_{yy}$  та вектор-векторної  $K_y$  передач поляризації, векторних і тензорних коефіцієнтів передачі поляризації для  $A(d,d')X$ - реакції можуть бути порівняні з теоретичними оцінками для інших потенціалів і слугувати прогнозуванням для їх експериментального визначення.

**Ключові слова:** потенціал, розсіяння, фазовий зсув, метод фазових функцій, зв'язані канали, дейтрон, хвильова функція, асимптотика, вузол, аналітична форма, поляризаційні спостережувані, формфактор, тензорна поляризація, асиметрія.

## АННОТАЦІЯ

**Жаба В.И. Волновая функция и поляризационные характеристики процессов с участием дейтрона. – На правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (доктора философии) по специальности 01.04.16 «Физика ядра и элементарных частиц и высоких энергий». – Институт ядерных исследований Национальной академии наук Украины, Киев, 2021.

Диссертационная работа посвящена исследованию нуклон-нуклонного рассеяния и анализу влияния формы волновой функции дейтрона в координатном представлении на расчеты поляризационных характеристик процессов с участием дейтрона.

В рамках потенциальной модели проведен детальный анализ структуры радиальной волновой функции дейтрона, асимптотика которой определяется полным моментом системы и характером поведения тензорного потенциала в начале

координат. Замечено, что выбор ошибочной (некорректной) асимптотики радиальных канальных функций может генерировать избыточные узлы волновой функции.

В диссертации представлен обзор результатов применения метода фазовых функций для поиска фазовых сдвигов одно- и двухканального рассеяния. Для ряда потенциалов осуществлена аппроксимация фаз  $np$ - рассеяния хорошо известной квадратичной функцией параболического типа Долгополова–Минина–Работкина.

Предложены две новые аналитические формы волновой функции дейтрона в координатном представлении для потенциалов Nijm I, Nijm II, Nijm93, Reid93, Argonne v18 в виде произведения степенной функции  $r^n$  на сумму экспоненциальных членов  $A_i \cdot \exp(-a_i \cdot r^3)$ , которые не содержат избыточных узлов у начала координат. На основе этих и других форм проведены расчеты и анализ асимптотик форм-факторов дейтрона и его структурных функций, а также поляризационных наблюдаемых в электрон-дейтронном и дейтрон-протонном рассеянии,  $A(d,d')X$ - реакции. Удовлетворительность теоретических оценок анализирующих способностей их имеющимся экспериментальным данным в различных областях  $t$ - масштабирования проанализированы в зависимости от примененной модели описания  $A(d,d')X$ - реакции и выбора потенциальной модели.

Полученные результаты дейтронных поляризаций  $t_{10}$ ,  $t_{11}$ ,  $t_{21}$ ,  $t_{22}$  для  $ed$ -рассеяния, тензорной анализирующей способности  $T_{20}$  и поляризационной передачи  $\kappa_0$  для  $dp$ - рассеяния, тензорной  $A_{yy}$  и векторной  $A_y$  анализирующих способностей, тензор-тензорной  $K_{yy}$  и вектор-векторной  $K_y$  передач поляризации, векторных и тензорных коэффициентов передачи поляризации для  $A(d,d')X$ - реакции могут быть сравнены с теоретическими оценками для других потенциалов и служить прогнозированием для их экспериментального определения.

**Ключевые слова:** потенциал, рассеяние, фазовый сдвиг, метод фазовых функций, связанные каналы, дейтрон, волновая функция, асимптотика, узел, аналитическая форма, поляризационные наблюдаемые, форм-фактор, тензорная поляризация, асимметрия.

## ABSTRACT

**Zhaba V.I. Wave function and polarization characteristics of processes with the participation of deuteron. – Manuscript.**

Thesis for Science Candidate Degree in Physics and Mathematics (Philosophy Doctor) by specialty 01.04.16 «Physics of Nucleus, Elementary Particles and High Energies». – Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2021.

The thesis is devoted to the study of nucleon-nucleon scattering and the analysis the influence of the form of the deuteron wave function (DWF) in coordinate representation on the calculations of the polarization characteristics of processes with the participation of deuteron.

The structure of the radial DWF is analyzed within the framework of the potential model. It is shown that the physical solution of the boundary problem can be constructed by two independent solutions of a coupled system of Schrödinger equations, the asymptotics of which are determined by the total moment of the system and the behavior of the tensor potential at the origin of the coordinates. The presence of such conditionality of asymptotic by the form of the tensor potential significantly differentiates the problem with coupled channels from the problem with a single Schrödinger equation. The choice of false (incorrect) asymptotic for radial channel functions can generate superfluous knots of DWF.

The thesis provides a review of the results of the application of the variable phase approach for finding single- and two-channel scattering phase shifts. The approximation of  $np$ -scattering phases for the list of potentials (Argonne v18, Nijm I, Nijm II, Nijm93, Reid93, OSBEP, Idaho-A, CD-Bonn, WJC-2, N<sup>3</sup>LO and model potentials of the Granada-2013 database) was carried out using a well-known parabolic-type quadratic function Dolgoplov–Minin–Rabotkin's. The obtained coefficients of this approximation function can be applied to calculate the scattering phase at any point in the energy interval of 1–350 MeV for these potentials, as well as to estimate the phase-dependent values.

New analytical forms as a product of power function  $r^n$  by the sum of the exponential terms  $A_i \cdot \exp(-a_i \cdot r^3)$  are proposed for approximate the DWF in the coordinate representation. Obtained by these forms of DWFs with the corresponding expansion coefficients for of Nijm I, Nijm II, Nijm93, Reid93 and Argonne v18 potentials do not contain superfluous knots. The calculated static deuteron parameters agree well with experimental and theoretical data. In addition, elementary Gaussian expansion and Laguerre functions are applied to approximate for DWF in the coordinate representation. These methods of obtaining DWFs provide correct asymptotics near the origin of the coordinates. The tabulated values of coefficients of DWFs for these potentials can be used for numerical calculations of the physical quantities that depend on DWF.

The asymptotics of the deuteron form factors and its structure functions, as well as the polarization observables in electron-deuteron and deuteron-proton scattering,  $A(d,d')X$  reaction were calculated and analyzed on the basis of these and other forms for DWF.

Was found expressions for spherical  $S_0^{(i)}$  and quadrupole  $S_2^{(i)}$  form factors, which are determined by the coefficients of analytical forms of deuteron wave functions in the coordinate representation. At large momentum values the asymptotics of the charge  $G_C$ , quadrupole  $G_Q$  and magnetic  $G_M$  deuteron form factors are determined by the coefficients of the analytical forms of DWF, the isoscalar nucleon form factors and the momentum. Positions of the zero for the deuteron form factors and the magnetic structure function  $B$  are compared with similar values for other potential models. A new approximation form for the ratio of the structure functions  $B/A$  for transmitted momentum  $p < 7.5 \text{ fm}^{-1}$  is also proposed when taking into account the relations for  $G_C$  ( $G_Q$ ) and  $G_M$  deuteron form factors.

The obtained results for deuteron polarizations  $t_{10}$ ,  $t_{11}$ ,  $t_{21}$ ,  $t_{22}$  for  $ed$ - scattering, tensor analyzing power  $T_{20}$  and polarization transmission  $\kappa_0$  for  $dp$ - scattering, tensor  $A_{yy}$  and vector  $A_y$  analyzing powers, tensor-tensor  $K_{yy}$  and vector-vector  $K_y$  polarization transfers, vector and tensor polarization transfer coefficients for  $A(d,d')X$  reaction can be taken into account in theoretical estimates for other potentials or in their experimental determination, since these values lack experimental data in a wide range momentums.

Satisfaction of the theoretical estimates of the analyzing powers of their available experimental data in different ranges of  $t$ -scaling is analyzed in detail depending on the model of description of  $A(d,d')X$  reaction (plane-wave impulse approximation or  $\omega$ -meson exchange) and the choice of the potential model.

**Key words:** potential, scattering, phase shifts, variable phase approach, coupled channels, deuteron, wave function, asymptotic, knot, analytic form, polarization observables, form factor, tensor polarization, asymmetry.