

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР
«ХАРКІВСЬКИЙ ФІЗИКО–ТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

КОТЛЯР ВОЛОДИМИР ВІКТОРОВИЧ

УДК 539.172

**ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПРОЦЕСИ
ЗА УЧАСТЮ ТРИЧАСТИНКОВИХ СИСТЕМ**

01.04.02 — теоретична фізика

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико–математичних наук

Харків — 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті теоретичної фізики імені О.І. Ахієзера
ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор,
академік НАН України
Бакай Олександр Степанович
Інститут теоретичної фізики імені О.І. Ахієзера ННЦ
«Харківський фізико-технічний інститут» НАН України,
завідувач відділу теорії конденсованих середовищ і
ядерної матерії.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник, доцент,
член-кореспондент НАН України
Холодов Роман Іванович,
заступник директора з наукової роботи
Інституту прикладної фізики НАН України;

доктор фізико-математичних наук,
Бугаєв Кирило Олексійович,
провідний науковий співробітник
відділу фізики високих густин енергії
Інституту теоретичної фізики
імені М.М. Боголюбова НАН України

Захист відбудеться «10» вересня 2021 р. о 14 годині на засіданні
спеціалізованої вченої ради Д 64.845.02 Національного наукового центру
«Харківський фізико-технічний інститут» НАН України за адресою:
61108, м. Харків, вул. Академічна, 1.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного наукового
центру «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України за
адресою: 61108, м. Харків, вул. Академічна, 1, та на офіційному сайті ННЦ
ХФТІ.

Автореферат розісланий «6» серпня 2021 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради,

канд. фіз.-мат. наук

А.І. Кірді́н

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Прогрес, досягнутий за останні десятиріччя в теорії електромагнітної взаємодії за участю тринуклонних ядер, є пов'язаним значною мірою з використанням розв'язків рівнянь Фаддєєва для зв'язаного стану та станів розсіювання, які отримано з сучасними реалістичними моделями ядерних сил. До числа таких моделей відносяться, наприклад, боннський CD-Bonn і аргонський AV18 нуклон–нуклонні потенціали, урбанські тричастинкові сили UrbIX.

До кінця 90-х років у радіаційному захопленні протонів дейтронами, фото– та електророзщепленні ядра ${}^3\text{He}$ було досліджено ефекти, які зумовлено перерозсіюванням у початковому або кінцевому станах. У розрахунках широко використовувалося припущення про одночастинкові механізми реакцій. Частина вкладів дво– та тричастинкових струмів взаємодії в амплітуди реакцій з реальними фотонами враховувалася в довгохвильовому наближенні за допомогою теореми Зігерта. Включення багаточастинкових струмів взаємодії є необхідною умовою [1*,2*] для забезпечення калібрувальної незалежності амплітуд електромагнітних процесів, що розраховуються. Як відомо з теорії реакцій електророзщеплення дейтрона [1*,3*], мезонні обмінні струми (МОС) можуть якісно змінити диференціальні перерізи та поляризаційні спостережувані. Отримання надійної інформації про електромагнітні форм-фактори нейтронів з даних про поляризаційні спостережувані в електророзщепленні ядра ${}^3\text{He}$, неузгодженість між результатами розрахунків і експериментальними даними для радіаційного захоплення та фотореакцій також вимагають більш послідовного розгляду та аналізу механізмів фотопоглинання, зокрема обумовлених струмами взаємодії. Двочастинкові механізми реакцій помітно збільшують [1*,4*–8*] диференціальні перерізи реакції $\gamma {}^3\text{He} \rightarrow p\,d$ та дозволяють зменшити розходження між розрахованими та вимірюваними перерізами. Роль МОС у цій реакції вивчалася в роботах [1*,4*–8*] у рамках наближення плоских хвиль для кінцевого стану, тобто взаємодія між протонами і дейтронами в кінцевому стані не враховувалась.

Необхідність розробки методів, на основі яких МОС можуть бути включеними в розрахунки з точними числовими розв'язками рівнянь Фаддєєва для зв'язаного стану та станів розсіювання, вивчення залежності теоретичних передбачень від моделей електромагнітного (ЕМ) струму та обчислень спостережуваних з хвильовими функціями (ХФ), що отримано з реалістичними ядерними силами, вивчення впливу компонент ХФ на спостережувані разом з потребою інтерпретації наявних даних та підготовки програм нових експериментальних досліджень визначає актуальність теми дисертації. Розвиток теорії ЕМ взаємодії за участю ядер ${}^3\text{He}$ та ${}^3\text{H}$, зокрема розробка підходів, які дозволяють врахувати прояви багаточастинкових механізмів реакцій, досліджувати структуру зв'язаного стану трьох нуклонів та обчислювати спостережувані в реакціях з реальними та віртуальними фотонами є актуальними завданнями як в фундаментальному, так і в прикладному відношеннях.

Мета та завдання дослідження. Основною метою дисертаційної роботи є розвиток теорії ЕМ взаємодії за участю тринуклонних ядер, яка враховує МОС та ґрунтується на сучасних досягненнях у розв'язанні рівнянь Фаддєєва для зв'язаних

станів і станів розсіювання. Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі були сформульовані такі основні завдання:

- Розробка методів і відповідних комп'ютерних програм для обчислення в імпульсному представленні вкладів двочастинкових МОС в амплітуди радіаційного захоплення протонів дейтронами, фото– та електророзщеплення ядра ${}^3\text{He}$. Істотною вимогою до розвинутих підходів є можливість проведення на їх основі обчислень з урахуванням перерозсіювання в початковому або кінцевому станах реакцій.

- Отримання представлення для матричних елементів оператора ядерного струму, яке дозволяє ефективно враховувати багаточастинкові струми взаємодії в обчисленнях амплітуд в імпульсному представленні з парціально–хвильовими компонентами ядерних станів.

- Побудова тензорної ХФ зв'язаного стану системи трьох нуклонів на основі числових розв'язків парціально–хвильових рівнянь Фаддєєва для реалістичних моделей ядерних сил та аналіз спінової структури ядер ${}^3\text{He}$ та ${}^3\text{H}$ з використанням розробленої тензорної форми для ХФ.

- Обчислення спостережуваних у процесах, що розглядаються, для пошуку кількісних та якісних ефектів, обумовлених двонуклонним поглинанням реальних і віртуальних фотонів. Дослідження відносної ролі одно– та двочастинкових механізмів реакцій, а також залежності спостережуваних від компонент ХФ ядер в різних кінематичних умовах.

Об'єктом дослідження є процес радіаційного захоплення протонів дейтронами та реакції двочастинкового розщеплення ядра ${}^3\text{He}$ реальними та віртуальними фотонами.

Предметом дослідження є механізми поглинання реальних і віртуальних фотонів системою взаємодіючих нуклонів, диференціальні перерізи та поляризаційні спостережувані в розглянутих реакціях, структура зв'язаних станів трьох нуклонів, що є залежною від спінів.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань в дисертації використовувались методи теорії ЕМ взаємодії за участю гадронів та атомних ядер, квантової теорії малонуклонних систем, квантової теорії кутового моменту та теорії спеціальних функцій математичної фізики, які є добре апробованими та широко застосовуються в теоретичній ядерній фізиці, теорії ядерних реакцій, зокрема в теорії ЕМ взаємодії за участю атомних ядер, фізиці елементарних частинок, а також у математичній фізиці.

Наукова новизна отриманих результатів. У дисертаційній роботі вперше отримано наступні результати:

1. Розвинуто підхід для дослідження ролі двочастинкових МОС в ЕМ взаємодії за участю систем трьох частинок. З використанням розкладання двочастинкових МОС по незвідних тензорних добутках спінових операторів розроблено метод для розрахунків амплітуд реакцій з реальними та віртуальними фотонами на ядрі ${}^3\text{He}$. Метод становить основу для обчислення амплітуд незалежно від функціональної форми МОС разом з використанням числових розв'язків парціально–хвильових рівнянь Фаддєєва в імпульсному представленні для реалістичних моделей ядерних сил. Для моделі МОС, що задовільняє рівнянню неперервності з потенціалом

однопійного обміну, знайдено також більш ефективний метод, що суттєво зменшує об'єм числових розрахунків.

2. Із застосуванням запропонованих методів розраховано диференціальні перерізи та поляризаційні спостережувані в реакції $p\ d \rightarrow \gamma\ ^3\text{He}$ з урахуванням двочастинкових МОС та з числовими розв'язками рівнянь Фаддєєва для зв'язаного стану та станів розсіювання. Показано, що МОС змінюють як кількісно, так і якісно кутові залежності спостережуваних у розглянутій реакції, які обчислено з включенням взаємодії між протоном і дейтроном у початковому стані.

3. Для реакції радіаційного захоплення протонів дейтронами проведено порівняння спостережуваних, отриманих з урахуванням струмів взаємодії за допомогою аналога теореми Зігерта та на основі явного включення МОС. Для диференціальних перерізів та поляризаційних спостережуваних вказано кінематичні умови, за якими струми взаємодії ефективно враховуються в рамках обраного підходу.

4. Отримано вирази для ХФ зв'язаного стану трьох нуклонів у тензорному представленні з використанням числових даних для парціально-хвильових компонент зі значеннями орбітальних моментів $0 \leq L, l \leq 5$, а також повних кутових моментів у двочастинковій підсистемі $J \leq 4$ та нуклона-спектатора $j \leq 9/2$. З використанням тензорної ХФ розраховано залежні від проекцій спінів імпульсні розподіли (ІР) нуклонів і протон-дейтронних кластерів у орієнтованих ^3N ядрах та зроблено детальний аналіз залежності цих ІР від вектора імпульсу нуклона-спектатора.

5. Диференціальні перерізи реакції $\gamma\ ^3\text{He} \rightarrow p\ d$ в області енергій фотонів E_γ вище порогу народження π -мезонів розраховано з тензорною ХФ ядра ^3He , яка включає вище згадані тринуклонні стани для аргонського AV18 нуклон-нуклонного потенціалу в поєднанні з урбанськими тричастинковими силами Urb-IX та з урахуванням МОС піонного радіусу дії (π МОС). Визначено групи компонент ХФ зв'язаного стану трьох нуклонів, для яких π МОС істотно впливають на спостережувані в цій реакції.

6. Показано, що π МОС якісно змінюють характер енергетичних і кутових розподілів диференціального перерізу двочастинкового фоторозщеплення ядра ^3He та коефіцієнта асиметрії Σ реакції з лінійно-поляризованими фотонами, які отримано з S-хвилями в ХФ ядра ^3He . Встановлено, що включення π МОС згладжує ці розподіли, та виявлено ефект заповнення глибокого мінімуму в перерізі реакції як функції енергії E_γ , а також зміни знака Σ .

7. Проведено детальний аналіз залежності спостережуваних від компонент ХФ ядра ^3He та показано, що в області енергій фотонів до 300 MeV вплив π МОС на спостережувані визначається компонентами ХФ з парними значеннями суми орбітального моменту та спіну пари нуклонів $L + S$, головним чином з $L = S = 0$. Виявлено, що струми взаємодії підсилюють роль S-хвиль по відношенню до інших компонент ХФ, та в цій області енергій фотонів додавання тринуклонних станів з $J = 3, 4$ до станів з $J = 0, 1, 2$ не має помітного впливу на спостережувані.

8. Розроблено модель π МОС, в якій враховуються ефекти сходу з енергетичної оболонки при поглинанні реальних фотонів системою взаємодіючих нуклонів, що належать масовій оболонці. З цією моделлю проведено обчислення перерізів реакції $\gamma\ ^3\text{He} \rightarrow p\ d$, та продемонстровано, що зменшення диференціального перерізу реакції

за рахунок таких модифікацій МОС досягає $\sim 30\%$ при $E_\gamma = 300 \text{ MeV}$ і куті емісії протонів $\theta_p = 90^\circ$.

Практичне та наукове значення отриманих результатів. Дослідження, що проведено в дисертації, сприяють поглибленню знань про механізми поглинання фотонів системою взаємодіючих нуклонів і спінової структури ядер ^3He та ^3H .

На основі розроблених в дисертації методів для розрахунків амплітуд реакцій отримано спостережувані в радіаційному захопленні протонів дейтронами та двочастинковому фоторозщепленні ядра ^3He з урахуванням вкладів двочастинкових МОС, та надано інтерпретацію результатів експериментів у Харкові, Univ. of Wisconsin tandem accelerator lab., Paul Scherrer Institut, Univ. of Illinois, Saskatchewan Accelerator Lab., Saclay, Frascati, Kyushu Univ., а також на Indiana Univ. Cyclotron Facility та MAMI accelerator in Mainz. Результати досліджень, що було проведено, використовувались під час підготовки експерименту в Paul Scherrer Institut і становлять інтерес для розробки програм нових експериментів.

Методи, що було запропоновано в дисертації, застосовуються та отримали подальший розвиток в [9*] та інших роботах, співавтором яких здобувач не є, для подальшого вивчення радіаційного захоплення протонів дейтронами, розщеплення ядра ^3He реальними та віртуальними фотонами, а також дослідження комптонівського розсіювання на цьому ядрі.

Розроблений підхід для обчислення амплітуд фотореакцій може послужити основою для створення нових методів, які не використовують парціально-хвильові розклади для опису зв'язаних станів і станів неперервного спектру в системах двох або трьох частинок, зокрема для розрахунків поляризації важких зачарованих (c) та боттом (b) кварків, що народжуються в розсіянні протонів або ядер.

Конструкції для ХФ ядер ^3He та ^3H , що запропоновано, можуть бути використаними в дослідженнях багаточастинкових механізмів процесів із участю цих ядер, наприклад, фото- та електронородження мезонів, розсіювання електронів, в якому порушується парність.

Тензорна форма є корисною для вивчення структури ХФ зв'язаного стану трьох нуклонів. В наступних роботах автора ХФ в тензорному представленні було виражено в термінах просторових, спінових та ізоспінових функцій, що перетворюються за незвідними представленнями симетричної групи, встановлено співвідношення між операторною формою Гержої-Швінгера та тензорною формою для ХФ а також запропоновано операторне представлення для просторово-парних та просторово-непарних компонент зв'язаного стану трьох нуклонів.

Підхід, розроблений для дослідження спінової структури ^3N ядер, може бути застосованим для аналізу поляризаційних властивостей c - та b -кварків у поляризованих зачарованих і боттом баріонах.

Особистий внесок здобувача. Результати дисертації опубліковано в статтях [1–8], доповідях [9–10] і тезах доповідей на наукових конференціях [11–15].

Основні результати, на яких написана дисертація, отримано здобувачем самостійно, в співавторстві за його безпосередньою участю або під його керівництвом.

У дослідженнях, що проведено зі співавторами, здобувач брав участь у формулюванні основних ідей досліджень, постановці завдань для їх реалізації, виборі та розробці методів їх розв'язання, у виконанні основних аналітичних розрахунків. Здобувач також здійснював контроль та верифікацію результатів спільної із співавторами роботи.

В роботі [1] автором запропоновано методи для дослідження двочастинкових механізмів радіаційного захоплення протонів дейтронами та двочастинкового розщеплення ядра ${}^3\text{He}$ реальними та віртуальними фотонами. За допомогою розроблених здобувачем методів їм проведено аналітичні розрахунки для знаходження матричних елементів ядерного струму, що містять МОС.

В [2–4] дисертант розробив підхід для обчислення поляризаційних спостережуваних, який дозволяє використовувати амплітуди реакцій [1], отримав представлення для Фур'є-образу матричного елемента ядерного струму, яке ефективно враховує частину струмів взаємодії та є аналогом теореми Зігерта. В [1–4] розробив частину програм для числових розрахунків і виконав частину обчислень.

В [5,6] здобувачем побудовано тензорне представлення для ХФ ядер ${}^3\text{He}$ та ${}^3\text{H}$, що використовує числові розв'язки рівнянь Фаддєєва для реалістичних моделей ядерних сил. З тензорною ХФ [5,6] автором проведено [7,9,10,15] дослідження IP нуклонів і протон–дейтронних кластерів, які залежать від спінових станів та поляризаційних спостережуваних в $e\text{-}{}^3\text{He} \rightarrow e' p d$. Використовуючи тензорну ХФ [5,6], здобувач провів у [5,6,11–14] аналіз впливу парціально-хвильових компонент зв'язаного стану системи трьох нуклонів та $\pi\text{МОС}$ на спостережувані в реакції $\gamma\text{-}{}^3\text{He} \rightarrow p d$ з лінійно поляризованими фотонами та на основі обчислень довів, що внески $\pi\text{МОС}$ в операторі ядерного струму істотно змінюють перерізи, зменшуючи розбіжності між результатами розрахунків та експериментальними даними.

В [6,8,9] дисертант запропонував модель $\pi\text{МОС}$, яка враховує ефекти сходу з енергетичної оболонки в поглинанні фотонів системою взаємодіючих нуклонів, які знаходяться на масовій оболонці, виконав числові розрахунки диференціальних перерізів $\gamma\text{-}{}^3\text{He} \rightarrow p d$ із цією моделлю струмів і показав, за яких умов такі модифікації струмів помітно впливають на диференціальні перерізи реакції.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертації було представлено на конференціях і симпозіумах:

- The 3rd International Symposium "Dubna Deuteron-95 (4–7 July 1995, Dubna, Russian Federation);
- European Research Conference "Polarization in Electron Scattering" (12–17 September, 1995, Santorini, Greece);
- XII International Symposium on High-Energy Spin Physics "SPIN-96" (10–14 September, 1996, Amsterdam, The Netherlands);
- Intern. Conference "Quantum Electrodynamics and Statistical Physics", dedicated to the 90th anniversary of A.I. Akhiezer (30 October–3 November, 2001, Kharkov, Ukraine);
- 17th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics, (5–10 June, 2003, Durham, USA);

- II, III, IV та VII щорічні Конференції з фізики високих енергій, ядерної фізики та прискорювачів (2004, 2005, 2006 і 2009, Харків, Україна),
- та було зроблено доповіді на наукових семінарах в
- ІФВЕЯФ ННЦ ХФТІ в 2000р. та в ІТФ ННЦ ХФТІ в 2010 та 2020р.;
- Kernfysich Versneller Instituut (1998, Groningen, The Netherlands);
- Departement für Physik und Astronomie, Universität Basel, (1999, Basel, Switzerland).

Зв'язок праці з науковими програмами, планами, темами. Дисертацію виконано в Інституті теоретичної фізики імені О.І. Ахієзера Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України відповідно до тематичного плану інституту, “Програми робіт з атомної науки і техніки ННЦ ХФТІ на 1993-2000 рр.”, “Програми проведення фундаментальних досліджень по атомній науці і техніки ННЦ ХФТІ до 2005 р. і “Державної програми фундаментальних і прикладних досліджень із проблем використання ядерних матеріалів, ядерних і радіаційних технологій у сфері розвитку галузей економіки на 2004-2010 рр.” Вона є складовою частиною наступних проєктів:

- тема № 04/52 "Термодинаміка і кінетика фазових перетворень у сильно нерівноважних системах, включаючи тверді тіла, що опромінюються, і переохолоджені рідини. Розробка теорії лептон– і гадрон–ядерних взаємодій при проміжних енергіях" (1997–1998 рр.);
- тема № 05/52 "Кінетика і термодинаміка фазових перетворень у сильно нерівноважних системах твердих тіл, що опромінюються, і переохолоджених рідинах. Розробка теорії ядерних процесів при проміжних енергіях" (1999–2000 рр.) ;
- тема № 06/52 "Дослідження кінетичних явищ у конденсованих системах, далеких від рівноваги. Розвиток теорії ядерних реакцій при проміжних енергіях" (2001–2002 рр.);
- тема № 52/07, № держреєстрації 08090UP009 "Теорія фазових перетворень і кінетичних явищ у неупорядкованих конденсованих системах. Розвиток теорії ядерних реакцій при проміжних енергіях" (2003–2005 рр.);
- тема № III-2-06 (ІТФ), № держреєстрації 080906UP0010 "Теорія аномальної релаксації та фазових перетворень у неупорядкованих середовищах. Вивчення взаємодій лептонів і гадронів з атомними ядрами в області проміжних енергій" (2006–2010 рр.);

При виконанні перелічених тем і проєктів автор дисертації був відповідальним виконавцем.

Публікації. Результати дисертації опубліковано в 15 наукових працях: у 8 статтях у фахових вітчизняних і міжнародних виданнях, у 2 доповідях у збірниках праць міжнародних конференцій а також у 5 тезах доповідей на вітчизняних і міжнародних наукових конференціях.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел з 197 найменувань на 19 сторінках та чотирьох додатків, що займають 8 сторінок. Робота містить 33 рисунки, два з яких займають всю сторінку, та три таблиці в тексті. Загальний обсяг дисертаційної роботи складає 192 сторінки, обсяг основної частини складає 141 сторінку.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** надано обґрунтування актуальності та важливості досліджень, що проведено в дисертаційній роботі; а також сформульовано мету досліджень; розкрито головні завдання та методи, що використовуються в роботі; представлено основні результати, що отримано, а також їх наукову новизну та практичне значення. Наведено відомості стосовно апробації результатів дисертаційної роботи та особистого внеску здобувача. Описано структуру дисертаційної роботи.

У **першому розділі** «Досягнення та невирішені проблеми в теорії електромагнітної взаємодії за участю тринуклонних ядер» наведено аналіз результатів робіт, в яких вивчалися механізми реакції фото– та електророзщеплення ядра ${}^3\text{He}$, а також радіаційного захоплення протонів дейтронами. Дано стислий огляд досліджень, в яких обчислення проводилися з розв'язками рівнянь Фаддєєва для зв'язаного стану трьох нуклонів з реалістичними міжнуклонними потенціалами та з моделями ЕМ струмів, які генеруються, так само як сили між нуклонами, обміном мезонами. Слідуючи [1*,4*,5*], обговорюється важливість узгодження моделей МОС та ядерних сил.

Розрахунки, що було проведено в [1*,4*–8*], використовували наближення плоских хвиль для кінцевих pd -станів. Водночас, як відомо з теорії [1*,3*] електророзщеплення дейтрону, взаємодія в кінцевому стані істотно впливає на спостережувані, що розраховуються. Урахування струмів взаємодії, що задовольняють рівнянню безперервності з гамільтоніаном ядра, сумісно з використанням для початкового та кінцевого станів власних функцій того ж гамільтоніану забезпечує [1*,2*] також незалежність розрахованих амплітуд від калібрування ЕМ поля. Дослідження ЕМ процесів за участю тринуклонних ядер та з розв'язками рівнянь фаддєєвського типу для станів безперервного спектру проводилися з одночастинковими струмами. В таких обчисленнях, як і в [4*–8*], калібрувальна незалежність результатів не досягається. В першому розділі обґрунтовується актуальність розробки методів для вивчення ЕМ взаємодії за участю $3N$ систем з використанням розв'язків рівнянь Фаддєєва для початкових та кінцевих станів разом зі струмами взаємодії та проведення відповідних розрахунків спостережуваних.

У **другому розділі** розглянуто підхід для обчислення амплітуд $\gamma \text{ } {}^3\text{He} \rightarrow p \text{ } d$, що було розроблено в роботах [1*,4*,5*]. В рамках плоско-хвильового наближення для кінцевого протон–дейтронного стану цей метод дозволяє врахувати одночастинкові та двочастинкові механізми реакції. Важливою його рисою є можливість проведення обчислень у широкому інтервалі енергії нижче та вище порогу народження π -мезонів без залучення мультипольних розкладів для ЕМ струму ядра. Цей підхід отримав подальший розвиток в розділах 4 та 5.

В підрозділі 2.1 коротко обговорюється модель ядерного струму, що використовується в даній роботі. ЕМ струм включає вклади конвекційного струму (КС), спінового та спин–орбітального струмів (СС та СОС), а також струмів, що генеруються обміном π - та ρ -мезонами. З ядерним струмом, що складається з таких частин, за винятком СОС, проводиться аналіз спостережуваних у радіаційному захопленні протонів дейтронами в розділі 4. Механізми реакції $\gamma \text{ } {}^3\text{He} \rightarrow p \text{ } d$ вивчаються в розділі 5 з одночастинковими КС та СС, СОС та π МОС, конструкції

яких надано в підрозділі 2.1. Для розробки моделі двочастинкових струмів, які враховують ефекти сходу з енергетичної оболонки в поглинанні реальних фотонів взаємодіючими нуклонами, також використовуються конструкції π МОС, що розглянуто в підрозділі 2.1.

Підрозділ 2.2 присвячено обговоренню властивостей симетрії амплітуд γ $^3\text{He} \rightarrow p\ d$, які є пов'язаними з просторовою інверсією, зверненням часу та відображенням відносно площини реакції. Тут наведено вирази для диференціальних перерізів і коефіцієнта асиметрії перерізів у реакції з лінійно поляризованими фотонами та вивчається структура цих виразів, яка обумовлена моделлю струму та конструкціями для ХФ, що використовуються. Показано, що вирази для диференціального перерізу γ $^3\text{He} \rightarrow p\ d$ не містять інтерференційних членів КС або МОС з СС або СОС. Такі співвідношення для амплітуд і перерізів дозволяють спростити обчислення, скоротити час, необхідний для числових розрахунків, і служать важливим засобом контролю точності отриманих результатів.

У підрозділі 2.3 амплітуди реакції γ $^3\text{He} \rightarrow p\ d$ перетворено до виду, який є зручним для проведення числових розрахунків з ХФ в імпульсному представленні. Визначено тензорне представлення для ХФ зв'язаного стану трьох нуклонів, що було запропоновано в [4*,5*]. Обчислення в цих роботах було виконано з ХФ зв'язаного стану трьох нуклонів для потенціалу Рейда з м'яким кором з використанням аналітичної параметризації для п'яти проекцій $\Psi_{\alpha}^{(1)}$ компоненти Фаддєєва $|\Psi^{(1)}\rangle$ на базис з квантовими числами α в схемі jJ -зв'язку. Наведено результати для спінових та ізо-спінових матричних елементів операторів двочастинкових струмів між тринуклонними станами. Демонструється, як в рамках підходу [1*,4*–5*] амплітуди записуються у вигляді багатократних інтегралів перекриття між матричними елементами ЕМ струму та ядерними ХФ в тензорній формі. Підінтегральні вирази в цих інтегралах містять функції, що визначають просторову структуру операторів ЕМ струму та ядерних ХФ. Для процесів, які обумовлено одно– та двочастинковими струмами, амплітуди виражаються через три– та шестивимірні інтеграли. Метод обчислення амплітуд [4*,5*], що засновано на використанні векторних змінних, не потребує мультипольного розкладання ядерного струму.

Методи, що викладено в розділі 2, було розроблено в роботах [4*,5*]. Ефективність цього підходу було продемонстровано в розрахунках [1*,4*–8*] спостережуваних у γ $^3\text{He} \rightarrow p\ d$ і в аналізі механізмів цієї реакції при енергіях фотонів E_{γ} від порогу реакції до області енергій збудження Δ -ізобари.

Методи обчислення амплітуд [4*,5*] використовуються та отримали подальший розвиток у [5–8] та в підрозділі 3.1, де досліджується тензорне представлення для ХФ, в розділі 5, де обчислюються амплітуди γ $^3\text{He} \rightarrow p\ d$ та вивчаються залежності спостережуваних від моделі ЕМ струму та ХФ.

Третій розділ присвячено детальному дослідженню тензорного представлення для ХФ зв'язаного стану трьох нуклонів та вивченню поляризації нуклонів та IP нуклонів і протон–дейтронних кластерів, що залежать від проекцій спінів, в орієнтованих $3N$ ядрах.

ХФ зв'язаного стану трьох нуклонів з повними кутовим моментом $J = \frac{1}{2}$ (ізотопічним спіном $T = \frac{1}{2}$) та проекцією m' ($M_T = \frac{1}{2}$) описується тензорним полем

$$\Psi_{m'}^{SMm}(\vec{p}, \vec{q}; T) = \langle \vec{p}, \vec{q}; SM \frac{1}{2} m; (T \frac{1}{2}) T M_T | \Psi; J m'; T M_T \rangle, \quad (1)$$

що має 32 комплексні компоненти. Це поле залежить від імпульсів Якобі $\vec{p}, \vec{q}$, спінових S, M, m та ізоспінових T, T змінних. Сумарний спін та ізоспін пари нуклонів 2 та 3 позначено S і T , проекцію S (спіну нуклона з номером 3) на вісь z — M (m'). Дотримуючись [5,6], в підрозділі 3.1 тензорну ХФ представлено у вигляді суперпозиції парціально-хвильових компонент $\Psi_\alpha(p, q)$ вектора $|\Psi; J m'; T M_T\rangle$.

Для обчислення ХФ в тензорному представленні використовуються числові розв'язки рівнянь Фаддєєва, що отримано бохумсько-краківською [9*] групою для $\Psi_\alpha(p, q)$ з реалістичними моделями міжнуклонної взаємодії, такими як боннський, паризький, аргонський AV18 нуклон-нуклонні потенціали та з AV18 у поєднанні з урбанськими тричастинковими силами Urb-IX, а також юліх-гельсінська (Baru V. et al. 2003) та інші параметризації парціальних компонент ХФ. Розрахунки в розділах 3–5 проведено на основі числових даних для 34 компонент $\Psi_\alpha(p, q)$, для яких кутові орбітальні моменти в двочастинковій підсистемі та нуклона-спектатора мають значення $0 \leq L, l \leq 5$, а також відповідні повні кутові моменти змінюються в інтервалах $0 \leq J \leq 4$ та $\frac{1}{2} \leq j \leq \frac{9}{2}$. Тензорна ХФ використовується в підрозділах 3.2 та 3.3 для обчислення поляризації нуклонів та ІР нуклонів і протон-дейтронних кластерів, що залежать від спінових змінних, в орієнтованих ^3N ядрах. В розділі 5 одно- та двочастинкові механізми фотопоглинання в реакції двочастинкового фоторозщеплення ядра ^3He також вивчаються з ХФ в тензорному представленні.

В підрозділах 3.1 та 3.2 детально розглянуто властивості симетрії ІР і показано, що тензорна форма для ХФ ядер ^3He та ^3H є зручною для такого аналізу. Поляризації нуклонів і ІР розраховуються з ХФ для різних потенціалів взаємодії між нуклонами. Продемонстровано, що спін-залежні ІР містять детальну інформацію про структуру зв'язаного стану трьох нуклонів.

Згідно з розрахунками, результати яких представлено в підрозділі 3.2, поляризація нейтрона в ядрі ^3He становить 87% ... 90% для розглянутих потенціалів взаємодії між нуклонами, тобто ймовірність виявити нейтрон у стані, коли його спін спрямований паралельно повному моменту ядра ^3He , близька до одиниці. Для поляризації протона отримано негативні значення, які змінюються в межах від -2.6% до -2% залежно від ХФ зв'язаного стану ^3N системи, що використовується. Поляризація нейтрона (протона) так само, як спін-залежні ІР нейтрона (протона) в орієнтованому ядрі ^3He визначаються компонентами ХФ зв'язаного стану трьох нуклонів зі значенням ізоспіну $T=1$ ($T=0,1$) у двочастинковій підсистемі.

Поляризації нуклонів, які є інтегральними характеристиками спінових станів нуклонів, а також ІР нуклонів та pd -кластерів, незначно залежать від ХФ, що використовуються, при значеннях імпульсів $q \leq 300$ MeV/c. Відмінності між ХФ, наприклад для паризького та боннського NN-потенціалів, помітно виявляють себе в ІР нейтронів (pd -кластерів) при $q \geq 300(450)$ MeV/c. При значеннях $q \sim 600$ MeV/c відношення цих ІР досягає величини ~ 1.5 . В області імпульсів $q \geq 500$ MeV/c найбільш значно відрізняються результати розрахунків ІР нейтронів (pd – кластерів) для

боннського потенціалу та потенціалу Рейда з м'яким кором (боннського та AV18UrbIX потенціалів). Асиметрії ІР нуклонів і pd -кластерів, що отримано, добре узгоджуються з розрахунками інших авторів. ІР протонів та нейтронів при $q < 300$ MeV/c, як показано на рис. 1, є близькими до результатів [10*] аналізу даних для спінових асиметрій в ${}^3\text{He}(\vec{p}, 2p)$ та ${}^3\text{He}(\vec{p}, pn)$.

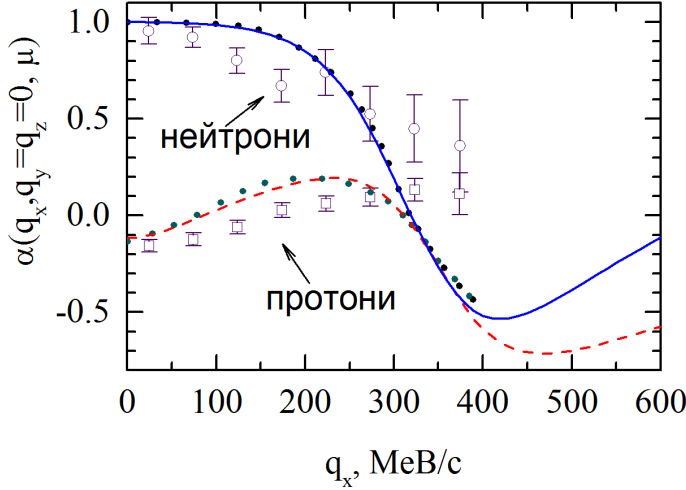


Рис. 1. Асиметрія залежних від проекцій спінів ІР нуклонів в поляризованому ядрі ${}^3\text{He}$. Суцільні та штрихові криві розраховано з бохум-краківськими ХФ [9*] для AV18UIX моделі ядерних сил. Точки $\bullet$ отримано в [10*] з ХФ для паризького потенціалу. Експериментальні дані $\circ$ та $\square$ взято також з [10*]

Виміри асиметрій [10*] було проведено в Indiana Univ. Cyclotron Facility. Розбіжності між результатами розрахунків та аналізу вимірювань [10*] на основі імпульсного наближення з плоскими хвилями свідчать про необхідність включення до розгляду механізмів реакцій, обумовлених МОС і взаємодією в кінцевому стані.

У підрозділах 3.2 та 3.3 вивчається залежність ІР від ХФ. Поляризації нуклонів а також ІР нуклонів і pd -кластерів незначно залежать від ХФ при значеннях імпульсів $q \leq 300$ MeV/c. Відмінності між ХФ, наприклад для паризького та боннського NN-потенціалів, помітно виявляють себе в ІР нейтронів (pd -кластерів) при $q \geq 300$ (450) MeV/c. В області імпульсів $q \geq 500$ MeV/c найбільш сильно відрізняються результати розрахунків ІР нейтронів (pd -кластерів) для боннського потенціалу та потенціалу Рейда з м'яким кором (боннського та AV18UrbIX потенціалів). Відповідні варіації ІР pd -кластерів показано на рис. 2.

У підрозділах 3.2 та 3.3 досліджено також залежність від спінових змінних ІР нуклонів і pd -кластерів у орієнтованих $3N$ ядрах як функції кутів вектора $\vec{q}$. Демонструється, що тензорна форма ХФ є зручною для аналізу властивостей симетрії та структури спін-залежних ІР. Представлення, що отримано для ІР, дають в явному вигляді залежності цих величин від напрямку вектора $\vec{q}$. Розрахунки, що проведено в підрозділі 3.1, дозволяють визначити області значень вектора $\vec{q}$, в яких поляризації нуклонів досягають помітної величини та орієнтовані ядра ${}^3\text{He}$ можуть становити інтерес для використання їх в якості ефективної поляризованої протонної або нейтронної мішені.

Результати, що отримано в розділі 3, тензорне представлення для ХФ та методи, що розроблено для обчислення та аналізу ІР нуклонів і pd -кластерів, використовуються в розділах 4 та 5 для дослідження амплітуд реакцій двочастинкового розщеплення ядра ${}^3\text{He}$ реальними та віртуальними фотонами. Такі амплітуди визначаються матричними елементами, в які входять як ядерні ХФ, так і оператор ЕМ струму.

Дослідження ІР, які проведено в розділі 3, служать важливим засобом контролю програм для обчислення значень ХФ, що залежать від векторних змінних, і методів багатовимірного числового інтегрування, які використовуються в розділі 5 з більш складними підінтегральними функціями.

У четвертому розділі з метою вивчення впливу двочастинкових МОС на перерізи реакцій та поляризаційні спостережувані в ЕМ процесах за участю тричастинкових систем було розвинено нові методи, які забезпечують включення МОС до розрахунків амплітуд в імпульсному представленні для зв'язаних станів та станів розсіяння трьох нуклонів з використанням числових розв'язків рівнянь Фаддєєва.

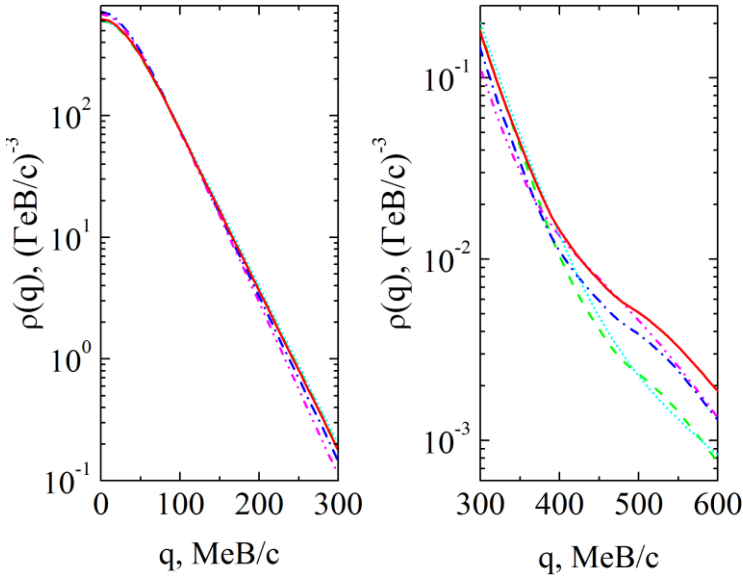


Рис. 2. Залежність ІР рd-кластерів в ядрі ^3He від моделі ядерних сил. Суцільна крива, штрихові криві з однією та двома точками отримано з ХФ для AV18UrbIX, паризького потенціалів та потенціалу Рейда. Штрихова та точкова криві розраховано з ХФ для боннського потенціалу. Точкову криву отримано з юліх–гельсінської сепарабельною по відносним імпульсам параметризацією ХФ, всі інші — з ХФ [9*]

Ааналіз і обчислення матричних елементів Фур'є перетворення операторів МОС піонного радіусу дії проведено для матричних елементів між зв'язаним станом трьох нуклонів та базисними станами в просторі трьох нуклонів з квантовими числами в схемі jJ –зв'язку. Трансформацію та спрощення матричних елементів, які мають вигляд багатовимірних інтегралів, здійснено за допомогою методів квантової теорії кутового моменту та спеціальних функцій математичної фізики.

Матричні елементи $\langle p'q'\alpha' | \vec{j}(\vec{Q}; 2,3) | pq\alpha \rangle$ операторів МОС $\vec{j}(\vec{Q}; 2,3)$ між векторами базису $|pq\alpha\rangle$ являють собою шестикратні інтеграли по кутовим змінним відносних імпульсів. Оператори $\vec{j}(\vec{Q}; 2,3)$ діють в просторі нуклонів 2 та 3. Ці матричні елементи було перетворено до виду суперпозиції добутків чотири- та двократних інтегралів I_2 та I_3 . Матричні елементи операторів МОС $\vec{j}(\vec{p}_2, \vec{p}_3; 2,3)$ між $3N$ станами $|\vec{p}\vec{q}\vec{K}\rangle$ з повним імпульсом $\vec{K}$ входять до

$$\vec{I}_2 = \int d\vec{p}' d\vec{p} \mathcal{Y}_{LSJM}^+(\vec{n}') \vec{j}(\vec{p}_2, \vec{p}_3; 2,3) \mathcal{Y}_{LSJM}(\vec{n}), \quad (2)$$

де $\vec{n} = \vec{p}/|\vec{p}|$ є одиничний вектор, $\vec{p}_2 = \vec{Q}/2 + (-1)^n(\vec{p}' - \vec{p})$ з $n = 2$ та 3 . Спін–кутові функції визначено як

$$\mathcal{Y}_{LSJM}(\vec{n}) = \sum_{M_L M_S} C_{LM_L M_S}^{JM} Y_{LM_L}(\vec{n}) |SM_S\rangle,$$

де $C_{LM_L M_S}^{JM}$ — коефіцієнт Клебша–Гордана, $Y_{LM_L}(\vec{n})$ — сферична функція, $S(M_S)$ — спін (його проекція) пари нуклонів з номерами 2 та 3.

Оператор $\vec{j}(\vec{p}_2, \vec{p}_3; 2, 3)$, що діє в спин-іспіновому просторі трьох нуклонів, розкладемо по незвідним тензорним добуткам $\{\sigma(2) \otimes \sigma(3)\}_{kk}$, що мають ранг $k = 0, 1$, та 2,

$$\vec{j}(\vec{p}_2, \vec{p}_3; 2, 3) = F_1^V \sum_{kk} \vec{O}^{kk}(\vec{p}_2, \vec{p}_3) \{\sigma(2) \otimes \sigma(3)\}_{kk} i[\vec{\tau}(2) \times \vec{\tau}(3)]_z, \quad (3)$$

де F_1^V — ізовекторний діраківський формфактор нуклона, $\vec{\sigma}(n)$ ($\vec{\tau}(n)$) — вектори Паулі в спіновому (іспіновому) просторі нуклонів з номером n .

Використовуючи (3), матричні елементи МОС (2) було перетворено до виду суперпозиції кутових інтегралів

$$\vec{M}_{lm}^{l'm'kk}(p', p; \vec{Q}) = \int d\hat{p}' d\hat{p} Y_{l'm'}^*(\vec{n}') \vec{O}^{kk}(\vec{p}_2, \vec{p}_3) Y_{lm}(\vec{n}).$$

В рамках одного з розроблених підходів ці інтеграли було розраховано на основі числових методів. Такий підхід забезпечив гнучкість в обчисленнях амплітуд досліджуваних процесів та використання різних моделей двочастинкових струмів.

З використанням аналітичних методів розмірність чотирьохкратних кутових інтегралів була зменшена до двох. Найбільш складні з них мають вигляд

$$\int_{-1}^{+1} dx dx' \bar{P}_{l'}^{m'}(x') \bar{P}_l^m(x) \bar{P}_1^{\mu_1}(x_1) \bar{P}_1^{\mu_2}(x_2) \bar{P}_1^{\mu_3}(x_3) R^M(p, p', Q; x, x'),$$

де $\bar{P}_l^m(x)$ нормовані приєднані поліноми Лежандра. Інтеграли

$$R^M(p, p', Q; x, x') = \int_0^{2\pi} d\varphi d\varphi' \exp[iM(\varphi - \varphi')] f(p, p', Q; x, x', \cos(\varphi - \varphi')),$$

було розраховано за допомогою аналітичних методів з функціями f , що породжуються МОС піонного радіусу дії. Лінійну комбінацію проєкцій $m', m, \mu_1, \mu_2, \mu_3$ позначено M . Змінні x_n з $n=1, 2$ та 3 зіставляються з x або x' .

Використання аналітичних методів дозволило провести незалежну перевірку числових результатів і прискорити числові розрахунки. Такий альтернативний підхід, для якого є важливою аналітична форма виразів для МОС, вимагає окремого розгляду кожної моделі двочастинкових струмів.

Розвинуто формалізм, на основі якого послідовно побудовано мультипольні розклади для Фур'є-образу ядерного струму. Без залучення довгохвильового наближення ці розклади перетворено з ціллю врахування частини вкладів багаточастинкових струмів взаємодії в мультиполях електричного типу, які виражено за допомогою рівняння безперервності в термінах матричних елементів зарядової щільності. Мультипольне представлення для струму ядра отримано в формі, яка дозволяє проводити з ним розрахунки в імпульсному представленні для станів нуклонів. Побудоване перетворення є аналогом теореми Зигерта.

На основі розроблених методів для обчислення матричних елементів МОС та мультипольного представлення для струму ядра проведено вивчення механізмів радіаційного захвату протонів дейтронами з урахуванням взаємодії в початковому стані реакції. Показано, що струми взаємодії істотно впливають на диференціальні перерізи та поляризаційні спостережувані та суттєво зменшують розходження між результатами обчислень та експериментальними даними в цій кінематичній області. Рис. 3 демонструє збільшення перерізу з включенням струмів взаємодії за кінематичних

умов, коли енергія протонів дорівнює 200 MeV. Таким умовам відповідає енергія фотонів 131,1 MeV у зворотному процесі двочастинкового фоторозщеплення.

З порівняння спостережуваних, що отримано з явними конструкціями МОС і за допомогою аналога теореми Зігерта, випливає, що при $E_\gamma \leq 70$ MeV обидва підходи дають близькі результати за винятком областей в кутових розподілах поблизу 0° та 180° . Відмінності між передбаченнями на основі цих підходів виявляються при більших енергіях.

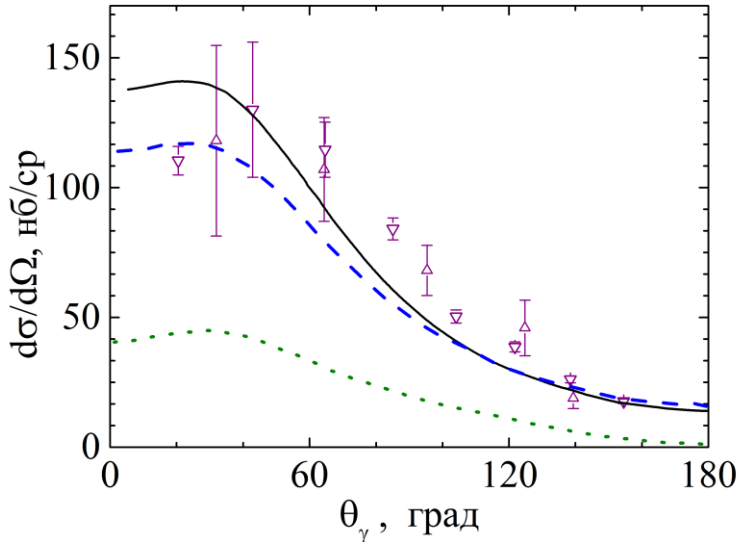


Рис. 3. Кутові розподіли фотонів в радіаційному захопленні протонів дейтронами при енергії протонів 200 MeV. Розрахунки з одночастинковим струмом, з аналогом теореми Зігерта та з урахуванням МОС показано точковою, штриховою та суцільною кривими, відповідно, точки ∇ та Δ — експериментальні дані [11*] та [12*]

У п'ятому розділі дослідження впливу МОС на спостережувані в радіаційному захопленні протонів дейтронами при енергіях нижче порогу народження π -мезонів було доповнено вивченням механізмів реакції $\gamma {}^3\text{He} \rightarrow p d$ поблизу та вище цього порогу. Ядерний струм, з яким розраховано амплітуди реакції, містить одночастинкові КС та СС, двочастинкові π МОС, а також СОС. Обчислення проведено з тензоровою ХФ зв'язаного стану трьох нуклонів та антисиметризованим добутком ХФ дейтрона та протона для кінцевого стану реакції.

В підрозділі 5.1 досліджено відносну роль розглянутих ЕМ струмів у формуванні енергетичних та кутових залежностей диференціального перерізу $\sigma(E_\gamma, \theta_p) \equiv d\sigma/d\Omega_p$ реакції фоторозщеплення ядра ${}^3\text{He}$ та коефіцієнта асиметрії Σ цієї реакції з лінійно поляризованими гамма-квантами. Розрахунки з ХФ для чотирьох реалістичних моделей ядерних сил показують, що використання одночастинкових механізмів фотопоглинання не дозволяє описати експериментальні дані для перерізу $\sigma(E_\gamma, \theta_p)$ при енергіях фотонів E_γ вище порогу народження π -мезонів.

Включення π МОС приводить до збільшення диференціального перерізу, яке може досягати, наприклад 3,85 (4,50) разів при енергії фотонів $E_\gamma = 100$ MeV (120 MeV) та куті емісії фотонів $\theta_p = 90^\circ$ в розрахунках з ХФ для AV18 (боннського) потенціалу. Включення двочастинкових механізмів фотопоглинання зменшує (збільшує) чутливість перерізів реакції (коефіцієнта асиметрії) до ядерних ХФ. Урахування струмів взаємодії значною мірою зменшує відмінності між результатами обчислень і експериментальними даними. Перерізи $\sigma(E_\gamma = 240 \text{ MeV}, \theta_p = 90^\circ)$, що отримано з КС, СС, СОС та π МОС з ХФ для боннського та AV18UrbIX потенціалів, складають $\sim 60\%$ та $\sim 75\%$ від експериментальних значень перерізу $\sigma(E_\gamma, \theta_p)$. В той же час, вклади π МОС, що розраховано в наближенні плоских хвиль, не

поліпшують опис даних про коефіцієнт асиметрії Σ . Відносна роль СОС збільшується з енергією фотонів, проте π МОС роблять менш помітним його вплив на спостережувані. Урахування СОС зменшує переріз $\sigma(E_\gamma, \theta_p)$ при кутах емісії протонів $\theta_p \leq 30^\circ$ та коефіцієнт асиметрії Σ при $60^\circ \leq \theta_p \leq 120^\circ$.

В підрозділі 5.2 досліджено залежності перерізів реакції $\gamma \ ^3\text{He} \rightarrow p \ d$ від компонент ХФ. Вперше показано, що вклади π МОС в амплітуду реакції якісно змінюють характер енергетичних і кутових розподілів перерізу $\sigma(E_\gamma, \theta_p)$ та коефіцієнта асиметрії Σ , що отримано з S-хвилями в ядерних ХФ. Як видно з рис. 4 включення π МОС згладжує ці розподіли та призводить до заповнення мінімуму функції $\sigma(E_\gamma, \theta_p=90^\circ)$, яка розрахована з конвекційним та спіновим струмами в S-хвильовому наближенні. Внески π МОС в амплітуду реакції змінюють знак Σ .

На рис. 4 показано розрахунки, що виконано з наборами компонент ХФ зв'язаного стану трьох нуклонів, що містять функції $\Psi_\alpha(p, q)$ з $\alpha = 1, \dots, N_\alpha$, де $N_\alpha = 2, 5, 10, 18, 26$ та 34 . S-хвилі з орбітальними кутовими моментами $L=l=0$, що мають $\alpha = 1, 2$, входять в набір компонент з $N_\alpha = 2$. D-хвилі, для яких $Ll=20, 02, 22$ та $\alpha = 3, 4, 5$, разом з S-хвилями належать групі з $N_\alpha = 5$. P-хвилі з повним кутовим моментом у двочастинковій підсистемі $J=0, 1$ та $\alpha = 6, \dots, 10$ разом зі станами, що мають та $\alpha = 1, \dots, 5$, містяться в наборі компонент ХФ з $N_\alpha = 10$. Група компонент з $N_\alpha = 18$ складається з функцій $\Psi_\alpha(p, q)$ з $J \leq 2$. Функції $\Psi_\alpha(p, q)$ з $J \leq 3(4)$ та $j \leq 7/2(9/2)$ входять в набори з $N_\alpha = 26(34)$.

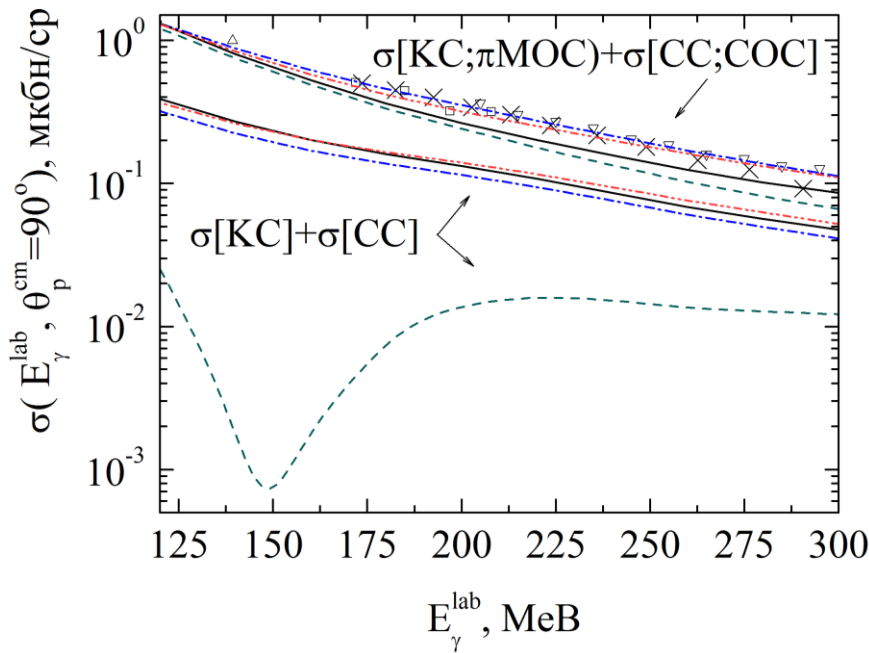


Рис. 4. Залежність диференціального перерізу реакції $\gamma \ ^3\text{He} \rightarrow p \ d$ від компонент $\Psi_\alpha(p, q)$ ХФ ядра $\ ^3\text{He}$ для потенціалу AV18UrbIX. Штрихові, штрих-пунктирні криві з однією та двома точками, суцільні криві отримано з $N_\alpha = 2, 5$ та $10, 34$, відповідно. Експериментальні дані $\Delta, \square, \nabla, \times$ взято з [12*-15*]

Вплив π МОС на спостережувані визначається компонентами ХФ з парними значеннями орбітального та спінового моментів $L + S$, головним чином з $L = S = 0$. Струми взаємодії підсилюють роль S-хвиль відносно до інших компонент ХФ. Диференціальний переріз і коефіцієнт асиметрії реакції в області $E_\gamma = 120 \dots 300$ MeV визначаються компонентами ХФ ядра $\ ^3\text{He}$ з повними кутовими моментами в двочастинковій підсистемі $J = 0, 1$ і 2 . Вклади компонент ХФ з $J = 3, 4$ не мають суттєвого впливу на спостережувані в кінематичній області, що було розглянуто.

В підрозділі 5.3 розроблено нову модель π МОС, яка дозволяє включити в теорію фотопроцесів на атомних ядрах ефекти сходу з енергетичної оболонки при поглинанні реальних фотонів системою взаємодіючих нуклонів, які знаходяться на масовій оболонці. В моделі, що запропоновано, струми містять ЕМ формфактори нуклонів. Аргументи цих формфакторів виражено через імпульси нуклонів, що беруть участь в процесі, та енергію фотона. Двочастинкові струми $\vec{j}^{[2]}(\vec{Q})$ задовольняють рівнянню безперервності $[V, \rho^{[1]}] = \vec{Q} \cdot \vec{j}^{[2]}$, де $V \in \text{NN}$ —потенціал. Одночастинковий оператор

$$\langle \vec{p}' | \rho^{[1]}(\vec{Q}) | \vec{p} \rangle = \delta(\vec{p}' - \vec{p} - \vec{Q}) F_1((E_{\vec{p}+\vec{Q}} - E_{\vec{p}})^2 - \vec{Q}^2)$$

є лідируючим членом в розкладанні Фур'є-образу щільності струму для діраківського струму нуклонів по параметру (p/M_n) , де M_n — маса нуклона. У граничному випадку, коли аргументи формфакторів покладаються рівними квадрату переданого 4-імпульсу, побудована модель призводить до конструкцій МОС, які було використано вище в розділах 2, 4 та 5.

З рис. 5 видно, що відмінності між обговорюваними моделями струмів проявляють себе в енергетичній залежності перерізу $\sigma(E_\gamma, \theta_p = 90^\circ)$ при $E_\gamma \geq 200$ MeV. Врахування ефектів сходу з енергетичної оболонки призводить до зменшення як значень перерізу σ так та відносної ролі МОС.

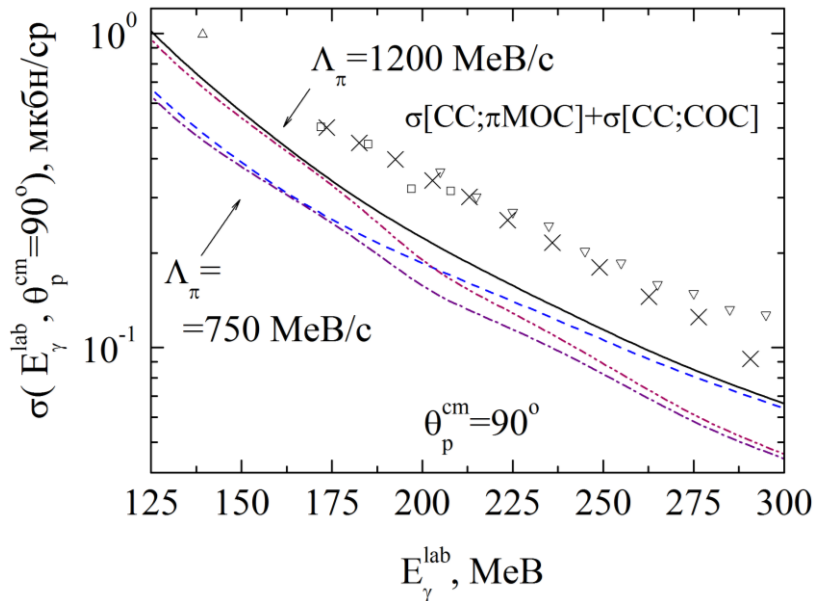


Рис. 5. Енергетичні залежності диференціального перерізу реакції $\gamma^3\text{He} \rightarrow p d$, що розраховано з ХФ для паризького потенціалу. Суцільна та штрихова (штрих-пунктирні) криві отримано без урахування (з включенням) ефектів сходу з енергетичної оболонки в ядерних струмах. Точки Δ , $\square$, ∇ , $\times$ — експериментальні дані з [12*–15*]

В розрахунках з включенням π МОС зміни перерізу при $\theta_p = 90^\circ$, що зумовлено сходом з енергетичної оболонки, складають 10 %, 22 % та 45 % при $E_\gamma = 140$ MeV, 200 MeV та 300 MeV, відповідно. Для порівняння зазначимо, що при збільшенні параметра обрізання Λ_π в πNN формфакторах від 750 MeV/c до 1,2 GeV/c переріз зростає на 48 %, 14 % та 3 % при тих же значеннях енергії фотонів. За тих же кінематичних умов розрахунки з ХФ для AV18UrbIX моделі ядерних сил дають переріз реакції більше на 21 %, 21 % та 27 %, ніж з ХФ для AV18 потенціалу. Таким чином, вплив ефектів сходу з енергетичної оболонки при поглинанні реальних фотонів системою взаємодіючих нуклонів, що належать масовій оболонці, на диференціальний переріз реакції $\sigma(E_\gamma, \theta_p = 90^\circ)$ є порівняним за величиною зі

зміними $\sigma(E_\gamma, \theta_p = 90^\circ)$ при включенні тричастинкових сил або при варіюванні параметра обрізання в πNN формфакторах, що входять в оператори МОС. Таке спостереження підкреслюють необхідність розгляду ефектів сходу з енергетичної оболонки та моделі МОС, що запропоновано.

ВИСНОВКИ

Результати проведених в дисертації досліджень є внеском у побудову теорії електромагнітної взаємодії за участю тринуклонних ядер. Розроблено нові методи та розвинуто раніше запропоновані підходи для обчислення амплітуд реакцій фоторозщеплення ядра ${}^3\text{He}$ та радіаційного захоплення протонів дейтронами. Застосування цих методів дозволило виконати дослідження ефектів мезонних обмінних струмів у реакціях $pd \leftrightarrow \gamma {}^3\text{He}$ в широкій кінематичній області. Результати аналізу та обчислень спостережуваних у розглянутих процесах застосовано для інтерпретації як виконаних, так для мотивації і планування нових вимірів.

В дисертаційній роботі отримано такі основні результати та висновки.

1. Розроблено новий метод для дослідження двочастинкових механізмів радіаційного захоплення протонів дейтронами, фото– та електророзщеплення ядер ${}^3\text{He}$ та ${}^3\text{H}$, який дозволяє проводити розрахунки амплітуд в імпульсному представленні з використанням розв'язків тринуклонних рівнянь Фаддєєва для початкових і кінцевих станів реакції.

2. За допомогою запропонованого методу та з використанням реалістичних моделей дво– та тричастинкових ядерних сил показано, що урахування двочастинкових струмів, які генеруються π – та ρ –мезонними обмінами, помітно впливає на диференціальні перерізи та поляризаційні спостережувані для реакції $p d \rightarrow \gamma {}^3\text{He}$. Обчислення показують, що цей метод є ефективним в області енергій до порогу народження π –мезонів. Про ефективність запропонованого методу свідчить також його подальше успішне застосування іншими авторами в дослідженнях реакцій $e {}^3\text{He} \rightarrow e' p d$, $e {}^3\text{He} \rightarrow e' p p n$, $\gamma {}^3\text{He} \rightarrow p d$ та $\gamma {}^3\text{He} \rightarrow p p n$.

3. Отримано представлення для Фур'є–образу матричного елемента ядерного струму, яке є аналогом теореми Зігерта. Ефективність цього представлення при урахуванні внесків багаточастинкових струмів взаємодії в амплітуди фотореакцій продемонстровано в розрахунках спостережуваних для радіаційного pd –захоплення, в яких використано числові розв'язки рівнянь фаддєєвського типу в імпульсному представленні для хвильової функції ядра ${}^3\text{He}$ та для урахування взаємодії між протоном та дейтроном у початковому стані реакції. Для реакції $p d \rightarrow \gamma {}^3\text{He}$ вказано кінематичну область, в якій застосування такого представлення є обґрунтованим.

4. Вперше побудовано та обчислено хвильову функцію зв'язаного стану системи трьох нуклонів в тензорній формі з використанням числових даних для парціально–хвильових компонент з орбітальними моментами $L, l \leq 5$ та повними кутовими моментами в двочастинковій підсистемі (нуклона–спектатора) $J \leq 4$ ($j \leq 9/2$). З хвильовою функцією в тензорному представленні досліджено залежність імпульсних розподілів нуклонів і протон–дейтронних кластерів від спінових змінних. Показано, що імпульсні розподіли визначаються невеликою кількістю

скалярних структурних функцій, які виражено через компоненти хвильової функції в тензорній формі. Отримано добре узгодження обчислених імпульсних розподілів з результатами аналізу експериментальних даних та обчисленнями інших авторів.

5. Вперше диференціальні перерізи γ $^3\text{He} \rightarrow p\ d$ та аналізуючу здатність пучка в реакції з лінійно поляризованими фотонами розраховано в області енергій вище порогу народження π -мезонів з 34х-канальними хвильовими функціями зв'язаного стану трьох нуклонів і з урахуванням мезонних обмінних струмів. Обчислення проведено для реалістичних моделей ядерних сил, в тому числі, для аргонського AV18 нуклон-нуклонного потенціалу в поєднанні з урбанськими тричастинковими силами UrbanaIX. Вперше показано, що мезонні обмінні струми заповнюють провал в енергетичній залежності диференціального перерізу, що отримано в S-хвильовому наближенні, та якісно змінюють характер поведінки диференціального перерізу. Згідно з розрахунками, які включають S-, P- та D-хвилі у хвильовій функції ядра ^3He , вклади мезонних обмінних струмів піонного радіусу дії помітно збільшують диференціальні перерізи реакції γ $^3\text{He} \rightarrow p\ d$.

6. Вперше проведено детальний аналіз залежності спостережуваних від компонент хвильової функції ядра ^3He та показано, що в області енергій фотонів до 300 MeV додавання тринуклонних станів з $J = 3,4$ до станів з $J = 0,1,2$ має незначний вплив на диференціальні перерізи та коефіцієнт асиметрії в двочастинковому фоторозщепленні ядра ^3He лінійно-поляризованими фотонами.

7. Розроблено нову модель мезонних обмінних струмів, яка включає в теорію ефекти сходу з енергетичної оболонки при поглинанні реальних або віртуальних фотонів системою взаємодіючих нуклонів, що знаходяться на масовій оболонці. Показано, що наслідком розглянутих ефектів є зменшення впливу мезонних обмінних струмів на диференціальний переріз реакції. Зміни перерізу за величиною є порівняними з його збільшенням при включенні тричастинкових сил або при варіюванні параметра обрізання в πNN формфакторах, що входять в оператори мезонних обмінних струмів.

8. Показано, що включення струмів взаємодії призводить до суттєвого зменшення відмінностей між результатами розрахунків та експериментальними даними в широкій області енергій фотонів нижче та вище порогу народження π -мезонів.

Таким чином у результаті проведених в дисертаційній роботі досліджень виконано всі завдання, що поставлено в дисертації, та досягнуто мету роботи.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Kotlyar V.V., Kamada H., Golak J., Glöckle W. Partial wave decomposition for meson exchange currents in few nucleon systems. *Few Body Systems*. 2000. Vol. 28, № 1. P. 35–63. [Квартиль Q2 \(2000\)](#).
2. Golak J., Kamada H., Witała H., Glöckle W., Kuroś J., Skibiński R., Kotlyar V.V., Sagara K., Akiyoshi H. Faddeev Calculations of Proton-Deuteron Radiative Capture with Exchange Currents. *Phys. Rev. C*. 2000. Vol. 62, № 5. P. 054005-1–054005-16. [Квартиль Q1 \(2000\)](#).
3. Kamada H., Golak J., Witała H., Glöckle W., Kuroś J., Skibiński R., Kotlyar V.V. Faddeev calculations of Proton-Deuteron Radiative Capture with π - and ρ -Meson

- Exchange Currents of the Argonne Potentials. *Nucl. Phys. A*. 2001. Vol. 684, №.3–4, P. 618–622. [Квартиль Q2 \(2001\)](#).
4. Golak J., Kamada H., Witała H., Glöckle W., Ziemer G., Kuroś J., Skibiński R., Kotlyar V.V. Selected electromagnetic processes in three–nucleon systems. *Nucl. Phys. A*. 2001, Vol. 689, № 1–2, P. 41–48. [Квартиль Q2 \(2001\)](#).
5. Kotlyar V.V., Belyaev A.A. Calculation of the cross section for the reaction at intermediate photon energies. *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nucl. Phys. Investigations*. 2001, Vol. 1(37), P. 50–52.
6. Kotlyar V.V., Belyaev A.A. Two–body photodisintegration of ^3He at intermediate energies. *Journal of Kharkiv National Univ., Phys. series: Nuclei, Particles, Fields*. 2001, Vol. 529, №3(15), P. 12–20.
7. Kotlyar V.V., Jourdan J. Spin structure of three–nucleon bound states. *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nucl. Phys. Investigations*. 2005, Vol. 6(45), P. 24–29.
8. Belyaev A.A., Glöckle W., Golak J., Kamada H., Kotlyar V.V., Witała H. Off–Shell Effects in Electromagnetic Interaction with Bound Nucleons. *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nucl. Phys. Investigations*. 2001. Vol. 6(1). P. 187–191.
9. Kotlyar V.V. Calculation of Polarization Observables in Photo– and Electrodisintegration of ^3He . *The 3rd Int. Symposium “Dubna Deuteron–95”*: Conference proceedings (4–7 July 1995, Dubna, Russian Federation). Dubna, 1996, P. 221–226.
10. Kotlyar V.V. Mechanisms of Two–Body Breakup of Polarized ^3He by Polarized Electrons. *The 12th Int. Symposium on High-Energy Spin Phys.*: Conference proceedings (10–14 September, 1996, Amsterdam, The Netherlands). Eds. C.W. de Jager, et al. World Scientific, 1997, P.402–404.
11. Kotlyar V.V. Two– and Three–Body Disintegration of ^3He by Polarized Photons and Electrons. *European Research Conference “Polarization in Electron Scattering”*: Book of abstracts (12–17 September, 1995, Santorini, Greece). Santorini, 1995. P. 85–86.
12. Kotlyar V.V., Nogga A., Kamada H., Golak J., Glöckle W., Witała H. Mechanisms of two–body ^3He photodisintegration above the pion production threshold. *17th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics*: Book of abstracts (5–10 June, 2003, Durham, USA). Eds. W. Glöckle et al. Durham, 2003. P. 210–211.
13. Котляр В.В. Асимметрии зависящих от спинов импульсных распределений нуклонов в ядрах ^3He и ^3H . *III Конференция по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям*: тезисы докладов (28 февраля – 4 марта, 2005, Харьков, Украина). Харьков, 2005. С. 17–18.
14. Котляр В.В. Возможность исследования ядерных волновых функций в расщеплении поляризованного ядра ^3He поляризованными электронами. *IV Конференция по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям*: тезисы докладов (27 февраля – 3 марта, 2006, Харьков, Украина). Харьков, 2006. С. 27–28.
15. Котляр В.В., Щеглова А.А. Зависящие от спинов импульсные распределения нуклонов в поляризованном ядре ^3He . *VII Конференция по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям*: тезисы докладов (23–27 февраля, 2009, Харьков, Украина). Харьков, 2009. С. 80.

СПИСОК ЦИТОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- 1*. Котляр В.В., Мельник Ю.П., Шебеко А.В.. Исследование поляризационных явлений в фото– и электрорасщеплении легчайших ядер при промежуточных энергиях. *Физика элементарных частиц и атомного ядра*. 1995. Т. 26, С. 192–274.
- 2*. Shebeko A.V. Towards Gauge–Independent Treatment of Radiative Capture in Nuclear Reactions: Applications to Low–Energy Cluster–Cluster Collisions. *Physics of Atomic Nuclei*. 2014. Vol. 77. P. 518–527.
- 3*. Korchin A.Yu., Shebeko A.V.. Calculation Of D(e,e') Cross–sections Near Threshold Taking Mesonic Exchange Currents Into Account. *Ядерная физика*. 1984. Т. 39. С. 12–15.
- 4*. Kotlyar V.V., Shebeko A.V. Nucleon–Nucleon Interaction and Meson Exchange Current Effects in ${}^3\text{He}$ Two–Body Breakup by Polarized Photons. *Zeitschrift für Physik A*. 1987. Vol. 327. P. 301–309.
- 5*. Котляр В.В., Шебеко А.В. Сохранение электромагнитного тока ядра и расчет сечений реакции ${}^3\text{He}(\gamma, p)d$. *Ядерная физика*. 1987. Т. 45, С. 984–993.
- 6*. Котляр В.В., Шебеко А.В. О механизмах реакции двухчастичного фоторасщепления ядра ${}^3\text{He}$ ниже и выше порога фоторождения пионов. *Ядерная физика*. 1990. Т. 51, С. 1008–1012.
- 7*. Котляр В.В., Шебеко А.В. О роли спин–орбитального электромагнитного взаимодействия в реакции $\gamma + {}^3\text{He} \rightarrow p + d$ при промежуточных энергиях. *Ядерная физика*. 1990. Т. 52, С. 1320–1324.
- 8*. Котляр В.В., Шебеко А.В. О механизмах реакции $\gamma + {}^3\text{He} \rightarrow p + d$ при энергиях фотонов в области гигантского резонанса. *Ядерная физика*. 1991. Т. 54, С. 423–425.
- 9*. Golak J., Skibiński R., Witała H. et al. Electron and photon scattering on three–nucleon bound states. *Phys. Rep.* 2005. Vol. 415. P. 89–205.
- 10*. Milner R.G., Bloch C., van den Brand J.F.J. et al. The spin dependent momentum distributions of the neutron and proton in ${}^3\text{He}$. *Phys. Lett. B*. 1996. Vol. 379. P. 67–72.
- 11*. Pickar M.A., Karwowski H.J., Brown J. D., et al. Proton radiative capture by deuterium between 100 and 200 MeV. *Phys. Rev. C*. 1987. Vol. 35. P. 37–44.
- 12*. O'Fallon N.M., Koester L.J., Smith J.H. Two–body photodisintegration of ${}^3\text{He}$ between 40 and 150 MeV. *Phys. Rev. C*. 1972. Vol. 5. P. 1926–1938.
- 13*. Kolb N.R., Cairns E.B., Hackett E.D. et al. ${}^3\text{He}(\gamma, pd)$ cross sections with tagged photons below the Δ resonance. *Phys. Rev. C*. 1994. Vol. 49. P. 2586–2591.
- 14*. Isbert V., Audit G., d'Hose N., Kerhoas S., et al. Two–body photodisintegration of ${}^3\text{He}$ between 200 and 800 MeV. *Nucl. Phys. A*. 1994. Vol. 578. P. 525–541.
- 15*. Argan P.E., Audit G., De Botton N. et al. Two–body photodisintegration of ${}^3\text{He}$ and ${}^4\text{He}$ in the Δ region. *Nucl. Phys. A*. 1975. Vol. 237. P. 447–464.

АНОТАЦІЇ

Котляр В. В. Електромагнітні процеси за участю тричастинкових систем. — На правах рукопису.

Дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата фізико–математичних наук за спеціальністю 01.04.02 «Теоретична фізика» (104 – Фізика та астрономія). –

Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України, Харків, 2021.

Дисертаційна робота присвячена розвитку методів у теорії електромагнітної взаємодії за участю систем трьох частинок та дослідженню процесів розщеплення ядра ${}^3\text{He}$ фотонами та електронами, а також радіаційного захвату протонів дейтронами.

Для вивчення впливу двочастинкових мезонних обмінних струмів (МОС) на диференціальні перерізи та поляризаційні спостережувані з використанням числових розв'язків рівнянь Фаддєєва для зв'язаного стану трьох нуклонів та урахування взаємодії в станах безперервного спектру розроблено методи для обчислення амплітуд реакцій в імпульсному представленні. Розвинуто формалізм, на основі якого послідовно побудовано мультипольні розклади для Фур'є-образу ядерного струму. Без залучення довгохвильового наближення ці розклади трансформовано для врахування вкладів багаточастинкових струмів взаємодії в мультиполях електричного типу, які виражено в термінах матричних елементів одночастинкового оператора зарядової щільності.

Методи, що запропоновано, використано для аналізу механізмів радіаційного захвату протонів дейтронами при енергіях нижче порогу народження π -мезонів. Показано, що струми взаємодії істотно впливають на диференціальні перерізи та поляризаційні спостережувані, суттєво зменшуючи розходження між результатами обчислень та експериментальними даними в цій кінематичній області. З порівняння спостережуваних, що отримано з явними конструкціями МОС, і з використанням перетворених мультипольних розкладів випливає, що при енергії фотонів до 70 MeV обидва підходи дають близькі результати. Відмінності між передбаченнями на основі цих підходів виявляються при більших енергіях та в кутових розподілах в областях поблизу 0° та 180° .

Дослідження впливу МОС на спостережувані в радіаційному захопленні протонів дейтронами при енергіях нижче порогу народження π -мезонів було доповнено вивченням механізмів реакції $\gamma^3\text{He} \rightarrow \text{pd}$ поблизу та вище цього порогу. Кінцевий стан реакції описувався антисиметризованим добутком хвильових функцій (ХФ) дейтрона та протона. Обчислення проведено з тензорною ХФ зв'язаного стану трьох нуклонів, що побудовано з числових розв'язків рівнянь Фаддєєва для реалістичних моделей дво- та тричастинкових ядерних сил. Розрахунки проведено для $3N$ станів з орбітальними (повними) кутовими моментами в двочастинковій підсистемі та нуклона спектатора з $L, l \leq 5$ ($J \leq 4$ та $j \leq 9/2$).

Показано, що використання одночастинкових механізмів фотопоглинання не дозволяє описати експериментальні дані про диференціальні перерізи реакції $\gamma^3\text{He} \rightarrow \text{pd}$ при енергіях фотонів вище порогу народження π -мезонів. Включення π МОС, які генеруються обміном π -мезонами, приводить до суттєвого збільшення диференціального перерізу та в значній мірі зменшує відмінності між результатами обчислень і вимірювань. Вклади π МОС якісно змінюють характер енергетичних і кутових розподілів перерізу та коефіцієнта асиметрії Σ , що отримано з S -хвилями, згладжуючи ці розподіли та заповнюючи мінімум у диференціальному перерізі як функції енергії, а також змінюючи знак Σ .

Розроблено модель π МОС, яка дозволяє включити в теорію фотопроцесів на атомних ядрах ефекти сходу з енергетичної оболонки при поглинанні реальних фотонів системою взаємодіючих нуклонів, які знаходяться на масовій оболонці. Показано, що наслідком урахування таких ефектів є значне зменшення впливу π МОС на диференціальні перерізи реакції.

З тензорною ХФ зв'язаного стану трьох нуклонів проведено також детальний аналіз імпульсних розподілів нуклонів і протон–дейтронних кластерів у орієнтованих ^3N ядрах.

Ключові слова: електромагнітна взаємодія, радіаційне захоплення, фотореакції, мезонні обмінні струми, ядра гелію та тритію, імпульсні розподіли, поляризаційні спостережувані.

Котляр В. В. Электромагнитные процессы с участием трехчастичных систем. — На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико–математических наук по специальности 01.04.02 «Теоретическая физика» (104 – Физика и астрономия). — Национальный научный центр «Харьковский физико–технический институт» НАН Украины, Харьков, 2021.

Диссертация посвящена развитию методов в теории электромагнитного взаимодействия с участием систем трех частиц и исследованию процессов расщепления ядра ^3He фотонами и электронами, а также радиационного захвата протонов дейтронами.

Для изучения влияния двухчастичных мезонных обменных токов (МОТ) на дифференциальные сечения и поляризационные наблюдаемые с использованием численных решений уравнений Фаддеева для связанного состояния трех нуклонов и учета взаимодействия в состояниях непрерывного спектра разработаны методы для вычисления амплитуд реакций в импульсном представлении. Развита формализм, на основе которого последовательно построены мультипольные разложения для Фурье–образа ядерного тока. Без привлечения длинноволнового приближения эти разложения трансформированы для учета вкладов многочастичных токов взаимодействия в мультиполи электрического типа, которые выражены в терминах матричных элементов одночастичного оператора зарядовой плотности.

Предложенные методы использованы для анализа механизмов радиационного захвата протонов дейтронами при энергиях ниже порога рождения π -мезонов. Показано, что токи взаимодействия существенно влияют на дифференциальные сечения и поляризационные наблюдаемые, существенно уменьшая различия между результатами вычислений и экспериментальными данными в этой кинематической области. Из сравнения наблюдаемых, которые получены с явными конструкциями МОТ, и с использованием преобразованных мультипольных разложений следует, что при энергии фотонов до 70 МэВ оба подхода дают близкие результаты. Различия между предсказаниями на основе этих подходов проявляются при больших энергиях и в угловых распределениях в областях вблизи 0° и 180° .

Исследование влияния МОТ на наблюдаемые в радиационном захвате протонов дейтронами при энергиях ниже порога рождения π -мезонов было дополнено изуче-

нием механизмов реакции $\gamma^3\text{He} \rightarrow \text{pd}$ вблизи и выше этого порога. Конечное состояние реакции описывалось антисимметризованным произведением волновых функций (ВФ) дейтрона и протона. Вычисления проведены с тензорной ВФ связанного состояния трех нуклонов, построенной из численных решений уравнений Фаддеева для реалистичных моделей двух- и трехчастичных ядерных сил. Расчеты проведены для $3N$ состояний с орбитальными (полными) угловыми моментами в двухчастичной подсистеме и нуклона–спектатора с $L, l \leq 5$ ($J \leq 4$ и $j \leq 9/2$).

Показано, что использование одночастичных механизмов фотопоглощения не позволяет описать экспериментальные данные о дифференциальных сечениях реакции $\gamma^3\text{He} \rightarrow \text{pd}$ при энергиях фотонов выше порога рождения π -мезонов. Включение π МОС, которые генерируются обменом π -мезонами, приводит к существенному увеличению дифференциального сечения и в значительной степени уменьшает различия между результатами вычислений и измерений. Вклады π МОС качественно меняют характер энергетических и угловых распределений сечения и коэффициента асимметрии Σ , которые получены с S -волнами, сглаживая эти распределения и заполняя минимум в дифференциальном сечении как функции энергии а также меняя знак Σ .

Разработана модель π МОТ, которая позволяет включить в теорию фото-процессов на атомных ядрах эффекты схода с энергетической оболочки при поглощении реальных фотонов системой взаимодействующих нуклонов, находящихся на массовой оболочке. Показано, что следствием учета таких эффектов является значительное уменьшение влияния π МОТ на дифференциальные сечения реакции.

С тензорной ВФ связанного состояния трех нуклонов проведен также детальный анализ импульсных распределений нуклонов и протон–дейтронных кластеров в ориентированных $3N$ ядрах.

Ключевые слова: электромагнитное взаимодействие, радиационный захват, фотореакции, мезонные обменные токи, ядра гелия и трития, импульсные распределения, поляризационные наблюдаемые.

Kotlyar V.V. Electromagnetic processes involving three-particle systems. — Manuscript copyright.

Thesis for a Candidate Degree in Physics and Mathematics: Specialty 01.04.02 —Theoretical physics|| (104 – Physics and Astronomy). – National Science Center —"Kharkiv Institute of Physics and Technology" NAS of Ukraine, Kharkiv, 2021.

The dissertation is devoted to development of methods in the theory of electromagnetic interaction with three-particle systems and to study of the ^3He breakup by photons and electrons, as well as the radiative capture of protons by deuterons.

To study the influence of two-particle meson exchange currents (MEC) on differential cross sections and polarization observables, using numerical solutions of the Faddeev equations for the $3N$ bound state and taking into account the interaction in the continuous spectrum, methods have been developed for calculation of the reaction amplitudes in the momentum representation. The multipole decompositions of the nuclear-current Fourier transform are consistently constructed within the proposed approach. Without employing the long-wavelength approximation, these decompositions are transformed to account for

the contributions of multiparticle interaction currents to multipoles of the electric type, which in turn are expressed in terms of the matrix elements of the one-particle charge-density operator.

The proposed methods are used to analyze the mechanisms of radiative capture of protons by deuterons at energies below the π -meson production threshold. It is shown that the interaction currents essentially affect the differential cross sections and polarization observables, significantly reducing the differences between the results of calculations and experimental data in this kinematic region. The differences between the predictions, based on the usage of explicit MEC constructions and of the transformed multipole decompositions, appear in angular distributions in vicinity of 0° and 180° and at energies above 70 MeV.

The study of the MEC influence on the observables in the radiative capture of protons by deuterons at energies below the π -meson production threshold is supplemented by the research into the mechanisms of the $\gamma^3\text{He} \rightarrow \text{pd}$ reaction near and above this threshold. The final state of the reaction is described by the antisymmetrized product of the deuteron and proton wave functions (WFs). The calculations are carried out with the tensor WF of the bound state of three nucleons, constructed from numerical solutions of the Faddeev equations for realistic models of two- and three-particle nuclear forces. The calculations are performed for 3N states with orbital (total) angular momenta in the two-particle subsystem and of the spectator nucleon with L , $l \leq 5$ ($J \leq 4$ and $j \leq 9/2$).

It is shown that the use of single-particle photoabsorption mechanisms does not allow one to describe the experimental data on the differential cross sections for the $\gamma^3\text{He} \rightarrow \text{pd}$ reaction at photon energies above the π -meson production threshold. The inclusion of πMEC , which are generated by π -meson exchanges, leads to an essential increase in the differential cross section and significantly reduces the differences between the results of calculations and measurements. The πMEC contributions qualitatively change the character of the cross section and the photon analyzing power Σ energy and angular distributions, which are obtained with S-waves, smoothing these distributions and filling the minimum in the differential cross section as a function of energy and also changing the sign of Σ .

A model of πMEC , which allows to include in the theory of photo-processes on atomic nuclei the off-the-energy-shell effects when real photons are absorbed by a system of interacting nucleons that belong to the mass shell, is developed. It is shown that account of these effects results in significant decrease in the πMEC influence on the differential cross section of the reaction.

A detailed analysis of the momentum distributions of nucleon and proton-deuteron clusters in oriented 3N nuclei is also carried out using the tensor WF of the bound state of three nucleons.

Keywords: electromagnetic interaction, radiative capture, photoreactions, meson exchange currents, helium and tritium nuclei, impulse distributions, polarization observables.