

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Котляра Володимира Вікторовича

«Електромагнітні процеси за участю тричастинкових систем»,
яка представлена на здобуття наукового ступеня кандидата фізико–
математичних наук (спеціальність 01.04.02 – «теоретична фізика»)

Розвиток теорії електромагнітної взаємодії за участю систем трьох нуклонів значною мірою зумовлений прогресом у вирішенні рівнянь Фаддєєва для зв'язаних станів та станів безперервного спектру таких систем. В теоретичному описанні радіаційного захоплення протонів дейтронами, розщеплення ядра ${}^3\text{He}$ реальними та віртуальними фотонами, вивченню яких присвячена дана дисертаційна робота, здобувачем використовуються розв'язки рівнянь фаддєєвського типу для реалістичних моделей дво– та тричастинкових ядерних сил. Відомо, що істотний вплив на перерізи та поляризаційні спостережувані таких процесів мають електромагнітні струми, які генеруються мезонним обміном між нуклонами, і тому значну увагу здобувач приділяє проблемі узгодження оператора струму із гамільтоніаном ядра. Треба підкреслити той факт, що використання в розрахунках оператора струму, який задовольняє рівнянню безперервності з гамільтоніаном ядра разом із власними функціями цього гамільтоніану для початкових та кінцевих станів, забезпечує калібрувальну незалежність амплітуд реакцій.

Добре відомо, що включення мезонних обмінних струмів до обчислень амплітуд реакцій з використанням розв'язків рівнянь фаддєєвського типу становить суттєву проблему для розвитку послідовної теорії електромагнітної взаємодії з три– та чотиринуклонними ядрами. Тому спрямованість дисертаційної роботи на розробку методів, що вирішують таку проблему для процесів за участю тричастинкових систем та на проведення обчислень, що дають інтерпретацію результатів експериментів, проведених в Харкові та в провідних зарубіжних ядерних центрах, без сумніву свідчить про те, що **тема дисертації є актуальною.**

Результати дисертації опубліковано в 4-х статтях у фахових вітчизняних виданнях і в 4-х статтях в міжнародних виданнях, з них одну – в журналі першого квартилю та три – в журналах другого квартилю, у 2-х доповідях у збірниках праць міжнародних конференцій та у тезах доповідей на вітчизняних і міжнародних наукових конференціях. Здобувачем зроблено доповіді по матеріалах дисертації на вітчизняних та міжнародних конференціях, а також на багатьох семінарах в ННЦ ХФТІ, в Kernfysich Versneller Instituut (Groningen, The Netherlands) та в Departement für Physik und Astronomie, Universität Basel, (Basel, Switzerland).

Дисертаційна робота повною мірою відповідає спеціальності 01.04.02 – «теоретична фізика». За змістом і структурою дисертаційна робота повністю відповідає вимогам до кандидатських дисертацій.

Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та чотирьох додатків. Список використаних джерел складається з 197 посилань. Обсяг дисертації складає 192 сторінки.

У **вступі** обґрунтовано вибір теми досліджень та її актуальність; чітко викладено мету та завдання дослідження; вказано зв'язок з науковими програмами та проектами; досить повно розкрито основні результати, які отримано, їх новизну та практичне значення; вказано особистий внесок здобувача; зазначено, на яких конференціях та семінарах доповідалися матеріали дисертації.

Перший розділ роботи присвячено обговоренню методів, що застосовуються в теорії фото– та електророзщеплення ядра ${}^3\text{He}$, а також радіаційного захоплення протонів дейтронами. В дослідженнях таких процесів використовуються розв'язки рівнянь фаддєєвського типу для початкових та кінцевих станів разом з одночастинковими операторами електромагнітного струму. В цьому розділі здобувачем чітко сформульовано висновок про необхідність розробки методів для включення струмів, що генеруються обміном мезонами, в розрахунки амплітуд процесів за участю тринуклонних ядер. На основі аналізу проведених досліджень в цьому розділі також зазначено та обґрунтовано задачі, що вирішуються в дисертації.

У **другому розділі** надано стислий опис моделі струму, з яким проведено розрахунки в розд. 4 та 5. Струм, що використовується здобувачем, складається з конвекційного та спінового струмів, струму від спин–орбітальної взаємодії нуклонів та двочастинкових мезонних обмінних струмів. Здобувачем вказано властивості симетрії амплітуд двочастинкового фоторозщеплення ядра ${}^3\text{He}$ та ці амплітуди перетворено до виду, який є зручним для числових розрахунків з хвильовими функціями в імпульсному представленні. В такому підході мультипольні розклади для ядерного струму не використовуються і амплітуди реакції мають вигляд багатовимірних інтегралів по векторам відносних імпульсів. Кінцевий стан реакції описується антисиметризованим добутком хвильових функцій дейтрона та протона. Підхід, що обговорюється в цьому розділі, було успішно застосовано здобувачем в його роботах. Подальше розвинення цього підходу наведено в розд. 4 та 5.

У **третьому розділі** роботи для хвильової функції зв'язаного стану трьох нуклонів в тензорній формі отримано представлення у вигляді суперпозиції парціально–хвильових компонент. В обчисленнях цих компонент використовуються результати бохумсько–краківської та інших груп, які отримано шляхом розв'язання рівнянь Фаддєєва для реалістичних моделей ядерних сил. За допомогою отриманого представлення для тензорної хвильової функції здобувачем вивчаються поляризації нуклонів та імпульсні розподіли нуклонів і протон–дейтронних кластерів в орієнтованих тринуклонних ядрах, що залежать від проекцій їхніх спінів. Імпульсні розподіли, що розраховано, порівнюються із результатами інших авторів та експериментальними даними. В цьому розділі здобувачем доведено ефективність методів, що застосовуються для дослідження та обчислення інтегралів перекриття між ядерними хвильовими функціями, які залежать від векторних змінних. Методи, які

розробляються та застосовуються здобувачем в даному розділі, використано також в розд. 4 та 5, де вивчаються амплітуди реакцій, що містять крім хвильових функцій також матричні елементи операторів одно- та двочастинкових електромагнітних струмів.

Треба підкреслити той факт, що представлення тензорної хвильової функції тринуклонних ядер, яке використовує повні розв'язки рівнянь Фаддєєва для реалістичних ядерних сил та аналіз просторової залежності спінових імпульсних розподілів є новим і оригінальним вкладом здобувача у теорію електромагнітної взаємодії із малонуклонними ядрами.

У четвертому розділі розроблено методи для урахування струмів взаємодії в амплітудах реакцій, в розрахунках яких використовуються числові розв'язки тринуклонних рівнянь фаддєєвського типу для початкового та кінцевого станів. Здобувачем проведено детальний аналіз вкладів в амплітуди реакцій, які генеруються π -мезонним обміном. В моделі, що використовується в цьому розділі, двочастинкові струми задовольняють рівнянню безперервності із потенціалом однопіонного обміну. З метою знайти ефективні підходи для обчислення матричних елементів здобувачем вивчено властивості та структуру тензора, який являє собою результат дії оператора електромагнітного струму ядра на вектор зв'язаного стану трьох нуклонів. В одному із запропонованих підходів для обчислення матричних елементів мезонних обмінних струмів інтеграли по кутових змінних відносних імпульсів розраховано на основі числових методів, що забезпечує значну гнучкість в дослідженнях з використанням різних моделей двочастинкових струмів. З метою зменшення розмірності кутових інтегралів, незалежної перевірки та прискорення числових розрахунків, що вимагають значних комп'ютерних ресурсів, здобувачем розроблено альтернативний метод, який дозволяє обчислити аналітично два з чотирьох кутових інтегралів. Але детальний аналіз, проведений в даному розділі, демонструє, що результати застосування всіх цих методів знаходяться в повній узгодженості.

За допомогою розроблених методів здобувачем розраховано кутові залежності диференціального перерізу та поляризаційних спостережуваних для радіаційного захоплення протонів дейтронами з розв'язками рівнянь фаддєєвського типу для урахування протон-дейтронного перерозсіяння в початковому стані та для хвильової функції ядра ^3He . Обчислення проведено в області енергій нижче порога народження π -мезонів. Показано, що внески струмів взаємодії в амплітуди реакцій є важливими для узгодження результатів розрахунків із експериментальними даними, як для диференціальних перерізів, так і для поляризаційних спостережуваних у всьому розглянутому інтервалі енергій.

Відмічу, що розвинуті здобувачем підходи для урахування струмів взаємодії в розрахунках із розв'язками рівнянь фаддєєвського типу для початкового та кінцевого станів реакцій та результати, отримані ним для спостережуваних в радіаційному захопленні протонів дейтронами, є новими.

У п'ятому розділі роботи досліджується цікава задача про двочастинкове фоторозщеплення ядра ^3He поблизу та вище порога народження π -мезонів.

Здобувачем проведено ретельне вивчення залежності спостережуваних цієї реакції від моделі електромагнітного струму системи взаємодіючих нуклонів та від ядерних хвильових функцій. Підкреслю той факт, що в розрахунках даного розділу здобувачем використано оператори одно- та двочастинкових струмів, конструкції яких надано в другому розділі та тензорна хвильова функція ядра ^3He , для якої використовуються результати третього розділу.

Показано, як залежать перерізи реакції з неполяризованими фотонами та коефіцієнт асиметрії цієї реакції з лінійно поляризованими фотонами від ядерних хвильових функцій та моделі електромагнітного струму. Розрахунки виконано із хвильовими функціями для боннського, паризького, аргонського AV18 нуклон–нуклонних потенціалів та з хвильовою функцією для аргонського AV18 потенціалу в поєднанні з урбанськими Urb-IX тричастинковими силами. На основі детального аналізу впливу компонент хвильової функції ядра ^3He на спостережувані, що отримано з урахуванням одно- та двочастинкових механізмів реакції, здобувачем показано, що диференціальний переріз та коефіцієнт асиметрії реакції в області енергій фотонів 120–300 MeV визначаються компонентами хвильової функції ядра ^3He з повними кутовими моментами в двочастинковій підсистемі $J = 0, 1$ та 2 , а вклади компонент хвильової функції із $J = 3, 4$ не є суттєвими.

В цьому ж розділі запропоновано нову модель мезонних обмінних струмів. Ця модель враховує ефекти сходу з енергетичної оболонки у взаємодії фотонів з нуклонами, що належать масовій оболонці. Розрахунки, які виконано в роботі, показують, що наслідком розглянутих ефектів є зменшення впливу мезонних обмінних струмів на диференціальний переріз реакції і, водночас, показано, що коефіцієнт асиметрії перерізів не є чутливим до таких ефектів.

Треба підкреслити те, що результати вивчення залежності диференціальних перерізів двочастинкового розщеплення ядра ^3He фотонами від хвильових функцій з повними кутовими моментами у двочастинковій підсистемі $J \leq 4$ та нуклона–спектатора $j \leq 9/2$, впливу мезонних обмінних струмів, модель струмів, що ураховує “off–energy–shell” ефекти, є новими.

При ознайомленні з дисертаційною роботою виникли зауваження здебільш рекомендаційного характеру. В розділах 2 та 5 проведено дослідження залежності імпульсних розподілів, що залежать від спінів, та спостережуваних в двочастинковому розщепленні ядра ^3He фотонами від хвильових функцій. Для деяких моделей міжнуклонних сил компоненти хвильових функцій показано у вигляді поверхонь, що залежать від двох відносних імпульсів. Здається доцільним навести більшу кількість таких рисунків для візуалізації якісних відмінностей між компонентами з різними квантовими числами та для різних потенціалів ядерних сил.

Також є незначні зауваження що до оформлення дисертації. Так у формулах 2-го розділу з (2.1) по (2.7) і (2.14) помилково використовано невизначені скорочення KT , CT , COT , MOT замість KS , CS , COS , MOS .

Дослідження, які проведено в дисертації, розширюють наші знання про взаємодію реальних та віртуальних фотонів з атомними ядрами, спин–залежні розподіли нуклонів та протон–дейтронних кластерів в тринуклонних ядрах.

Методи та підходи, які розроблено в дисертації, застосовано для обчислення диференціальних перерізів та поляризаційних спостережуваних в двочастинковому фото– та електророзщепленні ядра ^3He , радіаційному захопленні протонів дейтронами. На основі розрахунків надано інтерпретацію результатів експериментів проведених у Харкові та на відповідних прискорювачах у провідних лабораторіях США, Італії, Франції та Німеччини.

Отримані здобувачем результати є корисними для підготовки нових експериментів. Методи, що було запропоновано в дисертації, застосовуються іншими науковцями та отримали подальший розвиток в роботах, співавтором яких здобувач не являється. Про високий рівень отриманих результатів свідчить і добре цитування робіт, на яких заснована дисертація. Все це свідчить про важливе практичне та вагоме наукове значення результатів, отриманих в дисертації. Тому я впевнений в тому, що розвинуті в дисертації методи можуть бути застосовані в інших задачах. Наприклад, для дослідження поляризаційних властивостей важких c та b кварків в поляризованих зачарованих та боттом баріонах, а також для вивчення поперечної поляризації таких кварків, що народжуються в зіткненнях важких іонів на прискорювачах RHIC та LHC.

Загальний висновок щодо дисертаційної роботи

Наведені зауваження не зменшують наукову вагу та важливість отриманих результатів, а також загальну високу оцінку роботи.

Дисертація В.В. Котляра є цілісною та закінченою науковою роботою. В цій роботі розвинуто нові методи в теорії електромагнітної взаємодії за участю тричастинкових систем, розроблено нову модель струму на їх основі, проведено розрахунки спостережуваних в розщепленні ядра ^3He реальними та віртуальними фотонами, а також в радіаційному захопленні протонів дейтронами. На основі обчислень надано інтерпретацію результатів експериментів, які було виконано в Харкові та за межами України.

Результати досліджень, які проведено в дисертації, вирішують проблему урахування двочастинкових механізмів в теоретичному вивченні процесів радіаційного захоплення протонів дейтронами, фото– та електророзщепленні ядер ^3He та ^3H з використанням розв'язків рівнянь Фаддеева для початкового та кінцевого станів таких реакцій для реалістичних моделей ядерних сил. Результати роботи є вагомими для подальшого розвитку цього напрямку досліджень у фізиці малонуклонних систем.

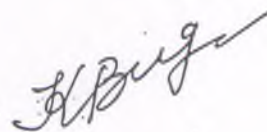
Основні результати дисертації є новими та обґрунтованими, їх опубліковано у 8-ми статтях у наукових фахових виданнях, серед яких журнали Few Body Systems, Phys. Rev. C та Nucl. Phys. A. Дисертаційна робота В.В. Котляра виконана на високому науковому рівні з використанням сучасних методів квантової та математичної фізики. В роботі здобуто низку нових результатів, наукове значення яких не викликає сумнівів. Автореферат та опубліковані роботи вірно та повно розкривають зміст, основні положення та висновки дисертаційної роботи.

Враховуючи високу актуальність теми досліджень в дисертації, обсяг, наукову значимість та новизну результатів, які отримано, разом з достовірністю та обґрунтованістю висновків, вважаю, що дисертація «Електромагнітні

процеси за участю тричастинкових систем», повністю задовольняє всім вимогам, що висуваються до кандидатських дисертацій згідно з «Порядком присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24 липня 2013 р. (зі змінами, внесеними згідно з Постановами КМУ № 656 від 19 серпня 2015 р., № 1159 від 30 грудня 2015 р., № 567 від 27 липня 2016 р.), а автор дисертаційної роботи, Котляр Володимир Вікторович, повною мірою заслуговує присудження наукового ступеня кандидата фізико–математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

Офіційний опонент

доктор фізико–математичних наук,
провідний науковий співробітник
відділу фізики високих густин енергії
Інституту теоретичної фізики
ім. М.М. Боголюбова НАН України



К.О. Бугаєв

Підпис К.О. Бугаєва засвідчую:

Вчений секретар
Інституту теоретичної фізики
ім. М.М. Боголюбова НАН України
кандидат фізико–математичних наук



С.М. Перепелиця

26 серпня 2021 р.