

Відгук

професора кафедри квантової теорії поля та космофізики Київського національного університету імені Тараса Шевченка, доктора фізико-математичних наук, член-кореспондента НАН України

Горбара Едуарда Володимировича

на дисертаційну роботу **Костиленка Яна Олександровича**

«Теоретико-польовий опис властивостей дейтрона та позитронію у зображенні одягнених частинок», подану на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 - «Фізика та астрономія» з галузі знань 10 – «Природничі науки»

Дисертація, що була представлена до захисту Костиленком Яном Олександровичем, належить до числа сучасних досліджень, у яких теоретико-польові методи тісно переплітаються з тими, що є типовими для нерелятивістської квантової механіки зі збереженням кількості частинок.

Предметом даної роботи є вивчення властивостей найпростіших зв'язаних систем: дейтрона та позитронію. У першому випадку дейтрон розглядається як система мезонних (а саме, π , η , ρ , ω , δ та σ) та нуклонних полів, що взаємодіють. Відповідний гамільтоніан містить фактори обрізання (cutoff factors), які вводяться в імпульсному просторі для уникнення ультрафіолетових розбіжностей, які притаманні цій моделі. У другому випадку автор демонструє в межах квантової електродинаміки (КЕД) оригінальні методи обчислення спектру станів та їх часів життя для парепозитронію. Цей шлях відкриває новий погляд на результати попередніх обчислень, що були виконані іншими авторами. В обох випадках дисертант застосовує концепцію так званих одягнених частинок, яка була запропонована у квантовій теорії поля О. Грінбергом та С. Швебером і розвинута після цього у роботах колаборації ІТФ ім. О.І. Ахієзера (Харків, Україна), National Institute for Nuclear Physics (Падуя, Італія) та Інституту електрофізики та радіаційних технологій (Харків, Україна).

Перехід до зображення одягнених частинок, тобто до частинок з фізичними властивостями, реалізується за допомогою унітарних одягаючих перетворень, які дозволяють виразити Гамільтоніан H та інші генератори групи Пуанкаре для системи (зокрема дейтрона) полів, що взаємодіють, та відповідні струми Нетер в термінах операторів народження та знищення одягнених частинок, що діють у просторі Фока з його фізичним вакуумом (станом без одягнених частинок). В результаті фізичний вакуум та одностинкові одягнені стани стають власними станами гамільтоніана H , що належать власним значенням зі звичайним законом дисперсії.

Безумовним досягненням Костиленка Я.О. є побудова нових, раніше невідомих, операторів взаємодії між одягненими мезонами та нуклонами у

мезодинаміці й електронами та позитронами у КЕД. Матричні елементи цих операторів в імпульсному просторі були ним успішно застосовані для непертурбативного розв'язання задач на власні стани, а саме, S - та D -компонент хвильової функції дейтрона та парціального розкладу основного та збурених станів позитронію. Знайдені результати добре узгоджуються з раніше відомими. Ще однією перевагою цієї роботи є розвиток альтернативного підходу при обчисленні масових зсувів (mass shifts) у теорії перенормувань. В цьому підході зсуви мас одягнених частинок та вершинних факторів, відповідно другого та третього порядку по константах зв'язку, визначаються під час процедури одягання, усуваючи небажані (в роботі вони названі “поганими”) члени, що заважають фізичному вакууму та одночастинковим станам бути власними станами гамільтоніана. Метод унітарних одягаючих перетворень дозволяє позбутися членів, що розбігаються, які пов'язані з проблемою перенормування, безпосередньо у гамільтоніані. Таким чином, вони більше не можуть з'явитися у S -матриці. Приклади обчислення масових зсувів електрона та нуклонів, завдяки обмінам векторними бозонами, демонструють винахідливість автора, позаяк отримані вирази виражаються через тривимірні інтеграли в імпульсному просторі. Автор елегантним чином продемонстрував їх незалежність від імпульсів та порівняв з результатами отриманими в межах теорії збурень Дайсона-Фейнмана. Вважаю, що такий підхід є корисним для застосування в інших польових моделях.

Велика увага в дисертації приділяється забезпеченню незалежності від вибору калібровки електромагнітного поля при обчисленні амплітуди розсіювання електронів на дейтроні. Як відомо, ця проблема у випадку електромагнітної взаємодії зв'язаних систем є доволі складною. Важливим моментом в її розв'язанні є те, що початковий польовий струм (струм Нетер) зберігається, як наслідок градієнтної інваріантності теорії в першому порядку за зарядом e , згідно з критерієм Фока-Вейля. Проте недосконале знання початкового та кінцевого станів розсіювання (особливо багаточастинкових хвильових функцій), спроби врахування структури частинок (як правило на феноменологічному рівні) та інші погано контрольовані дії, призводять до порушення незалежності від вибору калібровки електромагнітного поля розрахунків. Для виходу з подібних ситуацій у дисертації пропонується використати певне розширення теореми Зігерта в якому амплітуда однофотонного процесу на зв'язаній системі заряджених частинок виражається через напруженості електричного та магнітного полів, тобто величин явно незалежних від вибору калібрування магнітного поля. Одночасно з тим, динаміка процесу міститься у матричних елементах з розтягненим (stretched) початковим імпульсом від узагальнених електричного та магнітного дипольних моментів системи. У цьому напрямку автору вдалося представити амплітуду пружного e - d розсіювання як суму внесків від одночастинкового адронного струму та двочастинкових мезонних струмів, відзначаючи, що перший є

узагальненням, так званого, релятивістського імпульсного наближення в теорії розсіювання швидких частинок на ядрах. Поява цього наближення ґрунтується на спостереженні, що один і той самий оператор густини струму Нетер використовується при теоретико-польовому описі як елементарного $e-N$ розсіювання, так і $e-d$ розсіювання. Автор нагадує, що, як відомо, одночастинковий внесок задовольняє умовам градієнтної незалежності та зосереджується на розгляді двочастинкових механізмів цього процесу, які обумовлені мезонними обмінами між нуклонами мішені. Згідно з відомою класифікацією цих обмінів, в дисертації розрізняються так звані, “mesonic” та “seagull” струми. Крім того, доводиться виділяти ізоскалярні та ізовекторні струми. Автор зауважує, що останні не дають внеску в амплітуду пружного $e-d$ розсіювання.

Варто відзначити кілька особливостей обмінних мезонних струмів, побудованих у дисертації. По-перше, оскільки в підході одягнених частинок всі частинки знаходяться на своїх масових оболонках, отримані вирази залежать лише від енергій, які визначаються фізичним законом дисперсії. По-друге, ці струми є операторами у зображенні числа частинок, тобто вони виражаються через відповідні оператори народження та знищення. Це значно розширює область їх застосувань, оскільки такі струми не залежать від вибору початкового та кінцевого станів, що є суттєвою перевагою порівняно з підходами, де струми будуються на основі матричних елементів оператора розсіювання.

Обчислення магнітного формфактора дейтрона демонструють, що врахування тільки одночастинкового струму недостатньо для опису пружного $e-d$ розсіювання при переданих імпульсах у ГеВній області. Треба відзначити, що оператори мезонних струмів можуть бути використані для опису реакцій зі складнішими ядрами. Це безумовно демонструє практичне значення результатів роботи.

В дисертації концепція одягання частинок, висунута багато років тому Грінбергом та Швебером, вдало комбінується з непертурбативними рецептами редукційної техніки релятивістської квантової теорії поля. Мені приємно відзначити, що дисертант сміливо впроваджував ці рецепти в стандартні дослідження ядерно-фізичних процесів. Зокрема, показані зв'язки між станами одягнених частинок та станами в in(out) формалізмі. Такі зв'язки є корисними, тому що дозволяють використовувати напрацювання in(out) формалізму при описі процесів у зображенні одягнених частинок.

При дослідженні властивостей позитронію дисертант використовує нові оператори релятивістської взаємодії між одягненими електронами та позитронами для того, щоб розв'язати відповідну задачу на власні значення. В роботі порівнюються пертурбативний та непертурбативний підходи до пошуку енергетичного спектра та станів парепозитронію. Автор використовує техніку віднімання Ланде для того, щоб усунути проблему інфрачервоних

сингулярностей, при непертурбативному чисельному розв'язанні парціального рівняння. Цікавим є те, що цю техніку було застосовано не тільки до кулонівської частини взаємодії, але також і до некулонівської. Це може бути корисним для розв'язання подібних інтегральних рівнянь. Знайдена енергія основного стану парапозитронію дещо відрізняється (на величину порядку 10^{-6} eV) від результатів отриманих В. Берестецьким, Ж. Піренном та Р. Ферреллом, але для порівняння з експериментом потрібно також обчислити відповідний енергетичний рівень ортопозитронію.

Загалом дана робота свідчить про те, що її автор, Костиленко Я.О. є зрілим вченим що спроможний розв'язувати складні задачі сучасної фізики. Отримані ним результати не обмежуються застосовуваннями показаними у дисертації. Вони створюють гарне підґрунтя для майбутніх досліджень у напрямках електрослабких взаємодій з ядрами, які швидко розвиваються.

Яна Олександровича відзначає висока вимогливість до себе, принциповість в наукових оцінках, новаторське відношення до дослідницької роботи та, найголовніше, відданість науці в наш непростий час. Він неодноразово виступав з гарними науковими доповідями, як у нашій країні, так і за її межами. Проведене дослідження переконує у високій теоретичній культурі автора.

Результати наукових досліджень, отриманих у дисертації, опубліковано у 6 статтях у виданнях, що індексуються в міжнародних наукометричних базах Scopus та Web of Science. Крім того, чотири статті опубліковані у виданнях, віднесених до першого - третього квартилів (Q1-Q3), таких як Physical Review D та Few-Body Systems. Цього більш ніж достатньо для дисертаційної роботи доктора філософії згідно з встановленими вимогами МОН України щодо публікацій основного змісту дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії зі спеціальності 104 — «Фізика та астрономія». Судячи зі змісту дисертації та публікацій є очевидним, що особистий внесок дисертанта в ці роботи є вирішальним.

Зауваження до дисертаційної роботи.

1. Було б доречно порівняти отримані результати з результатами знайденими в кіральній теорії збурень.
2. У 2 розділі дисертації метод одягнених частинок застосовується до вивчення проблеми перенормування маси в квантовій теорії поля. У фізиці елементарних частинок надзвичайно важливим прикладом перенормування і генерації маси є динамічне порушення кіральної симетрії в теорії сильних взаємодій. Тому було б природнім навести в дисертації аргументи щодо перспективності застосування методу одягнених частинок для дослідження динамічного порушення кіральної симетрії в теорії сильних взаємодій.
3. У 4 розділі дисертації згадується, що дейтрон має 3 електромагнітні формфактори, а саме, електричний монопольний, електричний квадрупольний

та магнітний дипольний формфактори. Але в роботі наведені розрахунки тільки останнього. Чим обумовлений такий вибір, та чи складно розрахувати два інші формфактори?

Наведені зауваження не зменшують цінність одержаних наукових результатів та не впливають на загальну позитивну оцінку роботи.

Загальна оцінка та висновок.

На основі написаного вважаю, що дисертація Костиленка Я.О. «Теоретико-польовий опис властивостей дейтрона та позитронію у зображенні одягнених частинок» відповідає спеціальності 104 — «Фізика та астрономія», всім вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження Вимог до оформлення дисертацій» та вимогам, викладеним у Постанові Кабінету Міністрів №44 від 12.01.2022 р. про затвердження «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти наукової установи про присудження ступеня доктора філософії».

На мою думку, Костиленко Я.О. заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 — «Фізика та астрономія» в галузі знань 10 — «Природничі науки».

Офіційний опонент:

Професор кафедри квантової теорії поля
та космофізики Київського національного
університету імені Тараса Шевченка
доктор фізико-математичних наук,
член-кореспондент НАН України

Едуард ГОРБАР