

Рецензія

провідного наукового співробітника відділу електродинаміки високих енергій у
речовині ННЦ «Харківський фізико-технічний

інститут» НАН України, доктора фізико-математичних наук,

старшого наукового співробітника

Бондаренка Миколи Вікторовича

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»

В дисертації представлено останній розвиток методу одягаючих унітарних перетворень (УСТ), зокрема, його застосування до задач квантової електродинаміки (КЕД). Цей метод виник ще в 1950-і роки, невдовзі після появи мезонної теорії ядерних сил, з бажання описати ядерні сили за допомогою поля відносно легких пі-мезонів, яке генерується важкими, квазістатичними нуклонами. Якщо, в рамках спрощеної моделі, вважати нуклон класичним джерелом незалежних мезонних квантів (нехтуючи взаємодією між мезонами), можна розрахувати мультимезонний когерентний стан навколо нуклона. Побудувавши таким чином «одягнений» нуклон, далі можна вважати цей стан новим «вакуумним», а гамільтоніан з урахуванням юкавської нуклон-мезонної взаємодії – діагоналізувати і вважати новим гамільтоніаном «без взаємодії». Формально, перехід від гамільтоніану вільних нуклонів до гамільтоніану «одягнених» досягається за допомогою унітарного перетворення – УСТ. Воно змінює оператори народження та знищення, а також маси частинок. У такій моделі метод УСТ дає вихід за межі теорії збурень, у чому й полягає його привабливість.

Якщо далі в такій моделі обчислити відповідну зміну маси нуклона, вважаючи його точковим, ця зміна виявиться нескінченною. Щоб зробити її скінченною, необхідно ввести нуклонний формфактор. Якщо припустити, що значна доля маси нуклона формується за даним механізмом (що нехтує віддачею нуклона при випусканні мезонів), радіус просторового формфактора буде аналогічним класичному радіусу електрона, із заміною його маси на нуклонну, а електромагнітної константи зв'язку – на мезон-нуклонну. Ця аналогія, на мою думку, може бути корисною в даному підході.

Оскільки окрім піонів існують й інші, зокрема, векторні мезони, за масою співмірні з нуклоном, але теж важливі для нуклон-нуклонної взаємодії, необхідно знайти вихід за межі моделі статичного нуклона. Тоді теоретична задача значно ускладнюється. Віддача в кожному акті взаємодії між квантами змінює струми в наступному акті, і можливості для непертурбативного опису зменшуються. Для апробації та розвитку методу УСТ в умовах релятивістської кінематики, О.В. Шебеком зі співавторами, одним з яких є дисертант Я.О. Костиленко, було розглянуто застосування даного методу до задач спінової КЕД, із використанням теорії збурень. При цьому електрон, подібно до нуклона, розглядався як частинка з формфактором, але неелектромагнітної природи – без зростаючої з переданим імпульсом двічі логарифмічної асимптотики, а натомість необмежено убуючий на великих переданих імпульсах. Слід наголосити, що це є невід'ємною частиною даного підходу, і на цьому ґрунтується наукова новизна отриманих результатів, що не зводяться до суто методичних. Чисельні результати при цьому дещо відрізняються від передбачень КЕД, оскільки дана теорія, строго кажучи, відрізняється від КЕД з її точковим електроном та перенормувальними умовами. Метою дисертації зокрема було проаналізувати ці відмінності.

Щодо застосування до КЕД, необхідно відзначити, що підхід УСТ порушує явну Лоренц- та калібрувальну інваріантність теорії, які є вельми суттєвими для перенормувальної процедури в КЕД, зокрема, для зниження ступенів розбіжності до логарифмічної, завдяки чому КЕД стає «природно» перенормованою. Тому при перенормуваннях в УСТ виникають свої труднощі. Також слід брати до уваги, що в традиційній КЕД класичний радіус електрона не є принципово важливим масштабом, на якому формується маса електрона. Причина полягає в тому, що ефекти віддачі електрона у його взаємодії з фотонами стають суттєвими значно раніше, на масштабі комптонівської довжини, тоді як масштаб ультрафіолетового (УФ) обрізання, завдяки лише логарифмічній розбіжності усіх петлевих внесків, (в тому числі до масового оператора), можна вважати більшим за усі експериментально досяжні масштаби. Що стосується сучасних уявлень про механізм формування мас елементарних частинок (наприклад, не тільки електрона, але й мюона), то він вважається не електромагнітним чи взагалі калібрувальним, а завдячуючим взаємодії з хіггсівським полем.

В Розділі 1 окреслюються основні ідеї методу УСТ, переважно ґрунтуючись на роботах М.І. Широкова та О.В. Шебека з співавторами. Посилання в цьому оглядовому розділі можна було б доповнити монографіями

N. N. Bogoliubov, D. V. Shirkov. *Quantum Fields*. NY, Benjamin, 1983.

E. Stefanovich. *Elementary Particle Theory, Vol. 3 – Relativistic Quantum Dynamics*. De Gruyter, 2019.

На завершення розділу, підхід UCT порівнюється з підходом LSZ. На мою думку, враховуючи подальші застосування в дисертації до задач КЕД, було б також корисно порівняти переваги й недоліки методу UCT та методу точних функцій Гріна в КЕД, адже в останньому з них електрони і фотони теж можуть вважатися «одягненими», але без втрати релятивістської та калібрувальної інваріантності. Можливо, також було б варто провести зв'язок із когерентними станами бозонного поля, які широко використовуються в КЕД.

Розділ 2 присвячений демонстрації того, що після розрахунку методом UCT масового зсуву ферміона завдяки випусканню та перепоглинанню ним векторного бозона можна встановити подібність інтегрального представлення для зсуву до інтегралів, що виникають в коваріантній теорії збурень, наприклад, для КЕД. Відволікаючись від поняття масового оператора в КЕД та його спінової структури, отримані формули (2.23), (2.24) у вигляді інтегралів за 3-вимірним імпульсним простором дійсно представимі через єдиний 4-імпульсний інтеграл, в якому проведено інтегрування за енергією методом лишків (це було б варто продемонструвати явно). Також видно, що в ліміті нескінченно важкого ферміона (2.23) зникає, тоді як (2.24) після регуляризації обрізанням набуває форми енергії бозонного поля з імпульсами, не більшими імпульсу обрізки. Це еквівалентно енергії класичного поля зовні сфери деякого малого радіусу, в дусі розрахунку класичного радіусу електрона.

Після врахування віддачі ферміона, інтеграли залишаються лінійно розбіжними. Ступінь розбіжності мала б знизитися до логарифмічної з урахуванням асимптотичної непарності підінтегрального виразу. Натомість, після інтегрування за кутами, формули (2.26), (2.27) виявилися квадратично розбіжними.

В Розділі 3 з мезон-нуклонної ефективній теорії поля на основі підходу UCT виводяться так звані мезонні струми, які є важливими для опису взаємодії ядер, зокрема, дейтронів, з фотонами. Отримані струми відрізняються від традиційних на величину порядку відношення квадрату маси мезона, яким обмінюються нуклони, до квадрату подвоєної маси нуклона. Це відношення характеризує величину віддачі нуклона при випусканні чи поглинанні мезона. Для ρ та η мезонів воно складає $\sim 10\%$. Було б цікаво обговорити феноменологічні наслідки отриманих відмінностей.

В Розділі 4 та Додатку С виведені вище мезонні струми застосовуються для побудови формфакторів та хвильової функції дейтрона. S і D компоненти цієї хвильової функції параметризуються сумою 11 «монопольних формфакторів» з еквідістантними масами, подібно до боннської параметризації. Були знайдені значення параметрів, що зрештою впливають з методу UCT. Ці значення дещо

відрізняються від боннських, але не погіршують згоду теоретичного квадрату формфактору дейтрона зі світовими експериментальними даними. На наведених графіках у логарифмічному масштабі ця згода виглядає дуже доброю. Цьому вочевидь не заважає те, що у підході автора, на відміну від паризького та боннського, не враховується двопійонний обмін.

На жаль, з фітування безпосередньо хвильової функції нелегко зробити фізичні висновки безпосередньо щодо мезонних обмінів – обміни якими мезонами є необхідним, а якими і за яких умов можна знехтувати, і чи справді необхідно враховувати обмін двома піонами для опису притягання між нуклонами в дейтроні. Судячи з усього, автор поки що не бере на себе таку відповідальність.

Розділ 5 присвячений застосуванню метода UST до гамільтоніану КЕД. Побудовано гамільтоніан квантової електродинаміки у зображенні одягнених частинок. Далі демонструється, що після розрахунків амплітуд розсіяння методом UST можна відновити їх Лоренц-інваріантність.

В Розділі 6 одержані вище, із використанням UST, амплітуди електрон-позитронного розсіяння в борівському наближенні застосовуються для розрахунку спектру позитронію. Таке наближення відповідає рівнянню Брейта (менш точному, ніж рівняння Бете-Солпітера, в якому рівні енергії позитронія стають комплексними, враховуючи можливість двохфотонної анігіляції). Вже в цьому наближенні для енергії зв'язку парапозитронію виникає різниця між передбаченням UST та передбаченням КЕД. Різницю можна було б перевірити експериментально, якби була розрахована також енергія зв'язку ортопозитронію. На жаль, інформація про неї в дисертації відсутня.

Як відзначається на стор. 148, імпульсний масштаб у формфакторі електрона вибирається рівним 207 масам електрона, тобто масі мюона. Оскільки цей (взагалі кажучи, модельно-залежний) параметр вказується з точністю до 3х значущих цифр, виникає питання, наскільки висока чутливість зсуву енергії до цього параметру. Також здається невинновим, що за порядком величини він співмірний зі зворотнім класичним радіусом електрона 137 мас електрона. Маса ж мюона навряд чи має відношення до даної задачі, в даному наближенні.

Дисертаційна робота добре структурована та написана. Результати розділені на наукові та методичні. Значну кількість технічного матеріалу винесено у Додатки. Стосовно тексту можна зробити ще декілька невеликих зауважень:

- Перспективи виходу за межі теорії збурень за допомогою методу UST в дисертації не обговорюються аж до останнього розділу, де метод застосовується до позитронію. Оскільки непертурбативність – принципова перевага методу, на ній слід було б наголосити відразу – у Вступі та в

Розділі 1. В області ж застосовності теорії збурень зручнішим може бути коваріантний опис.

- У Розділі 2 було б доцільно порівняти рецепти перенормування маси в УСТ та в коваріантній КЕД, в якій на масовій поверхні масовий оператор електрона за визначенням повинен зникати.
- В Таблиці 4.1 для параметрів фітування хвильової функції дейтрона було б цінно вказати невизначеності цих параметрів, а також їх початкові значення. Без цього незрозуміло, наскільки фіт стійкий, і чи дійсно потрібні всі його 11 доданків. Для порівняння також не завадило б навести боннські параметри.
- У Розділі 6 не розраховано зсув енергії ортопозитронію (лише пара-). Без цього висновки у відповідному розділі дисертації не можуть вважатися повними.
- В розділах дисертації чимало нетрадиційно використовуваної термінології. Наприклад, у Розд. 1 та 2 counterterms означають не доданки у лагранжіані вільних полів та їх елементарних взаємодій, що мають компенсувати УФ розбіжності петлевих внесків, а члени в гамільтоніані, що виникають після застосування УСТ, і від яких потім позбуваються. Contact terms означають не члени в гамільтоніані, пропорційні дельта-функції (чи її похідним) від різниці координат взаємодіючих частинок, а взагалі будь-який 4-нуклонний оператор, наприклад, миттєву кулонівську взаємодію на довільно великих відстанях. В Розділі 3 тричі наголошується, що при конструюванні мезонних струмів в основу кладеться критерій Фока-Вейля, але ніде в дисертації він не сформульований. Якщо я не помиляюсь, цей термін було введено О.В. Шебеком зі співавторами. У Розд. 4 structure function означає не коефіцієнт у диференціальній ймовірності інклюзивного глибоко-непружного розсіяння, а суму двох квадратованих амплітуд пружного. Під Mandelstam variables у Рівн. (5.56) маються на увазі кінематичні 4-вектори, а не їх квадрати. Втім, у Висновках жодна незвична термінологія не вживається.

Наголошу, що враховуючи значний об'єм дисертації (193 стор.), згадані недоліки не є критичними і не знижують значення здобутих цікавих результатів.

Підсумовуючи, дисертація розвиває метод, який має своїх прихильників у світовій науці, і може бути корисним також для задач КЕД. Як приклад, когерентні стани електромагнітного поля описують квантові поля лазерів, тоді як ультрарелятивістські електрони рівною мірою можуть бути джерелами багатифотонного пуасонівського чи цілком когерентного випромінювання. У

застосуванні до релятивістських задач, дисертація розкриває певні труднощі методу UCT, але й намічає шляхи для їх подолання.

Результати дисертації опубліковані у провідних світових та вітчизняних наукових виданнях, зокрема, Physical Review D та Українському фізичному журналі; пройшли апробацію на фахових міжнародних конференціях. Публікації здобувача (6 статей, з яких 4 у виданнях, індексованих Scopus/Web of Science, а також 1 розділ у колективній монографії, і 3 тези доповідей на міжнародних наукових конференціях) повністю відповідають вимогам до присудження наукового ступеня доктора філософії.

Аналіз дисертаційної роботи та публікацій автора не виявив порушень академічної доброчесності, плагіату. Деякі запозичення тексту англійською мовою робилися лише з власних публікацій автора. Самостійність автора у виконанні дослідження та написанні дисертації не викликає сумнівів. Дисертант продемонстрував володіння методами квантової теорії поля, знайомство з науковою літературою, запропонував та реалізував власні оригінальні підходи до важливих фізичних задач.

Відтак, на мою думку, дисертація «Теоретико-польовий опис властивостей дейтрона та позитронію у зображенні одягнених частинок» є завершеною науковою працею, яка містить нові теоретичні результати. Робота Костиленка Яна Олександровича відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року №44, а її автор заслуговує на присудження йому ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія» з галузі знань 10 – «Природничі науки».

Офіційний рецензент:

провідний науковий співробітник
відділу електродинаміки
високих енергій у речовині
ІНЦ ХФТІ НАН України,
доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник

Бондаренко М.В.