

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Дувіряка Аскольда Андрійовича

***“Лагранжіани з часовою нелокальністю і
релятивістична квантова задача кількох тіл”***,

подану на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук

за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика

Дисертаційна робота присвячена проблемі побудови квантового опису малочастинкових релятивістських систем в рамках теорії дії на відстані, що базується на формалізмі інтегралів дії типу Фоккера, у свою чергу пов'язаних з класичною теорією поля. У цьому відмінність запропонованого підходу від рівнянь Бете-Салпітера та інших рівнянь, що мають квантово-польове походження. Актуальність побудови такої релятивістської квантової механіки кількох частинок має вагомі причини. Квантова теорія поля (КТП) дає опис процесів з необмеженим числом частинок і будується як перенормовна теорія збурень за константою взаємодії. Для формулювання задачі на зв'язані стани кількох тіл в рамках КТП необхідно допустити ті чи інші наближення, що приводять до загалом різних результатів. Тому, по перше, важливо мати підхід, незалежний від КТП. По-друге, хоча електромагнітна, слабка і частково сильна взаємодії допускають послідовний опис у рамках КТП, взаємодії між кварками в гадронах, композитних частинок (нуклонів, ядер, атомів) між собою неможливо вивести з перших принципів теорії. В останніх випадках користуються описом в рамках ефективних теорій поля, що не передбачають послідовної процедури перенормування, але базуються на класичних теоретико-польових лагранжіанах. Запропонований у дисертації підхід застосовний саме до таких випадків. Нарешті, його можна розглядати як напів-феноменологічний підхід, узгоджений із загальними принципами (варіаційним, інваріантності тощо), що завдяки зв'язку із класичною теорією поля забезпечує фундаментальність взаємодій, але допускає їх феноменологічну корекцію для кращого узгодження з експериментом.

Основою підходу є інтеграли дії типу Фоккера або частково редуковані нелокальні лагранжіани, отримані шляхом усунення поля, що переносить взаємодію у вихідному локальному описі системи. Головною методичною проблемою, з якою зустрівся дисертант, є конструктивна побудова гамільтонових описів систем, заданих фоккерівськими інтегралами або лагранжіанами з часовою нелокальністю, та їх квантування. У дисертації застосовано 4 наближені методи для розв'язання цієї проблеми: наближення часо-асиметричної взаємодії, наближення майже колових орбіт (або розкладів за $1/\ell$), квазірелятивістських наближень (або розкладів за $1/c$), і розкладів за константою взаємодії. Розвинуті загальні методи застосовано до опису двочастинкових і тричастинкових систем, що представляють фізичний інтерес, зокрема кваркових моделей мезонів та баріонів.

Дисертаційна робота виконана в Інституті фізики конденсованих систем НАН України. Представлені в дисертації результати отримані згідно планів робіт в рамках бюджетних тем НАН України: "Розробка концепції форм релятивістської

динаміки як просторово-часових описів системи частинок" (1991–1995 рр., номер державної реєстрації 01.9.10-002366), "Релятивістична механіка класичних і квантових систем частинок з внутрішньою структурою в теорії прямих взаємодій" (1996–2000 рр., номер державної реєстрації 0196U002366), "Термодинаміка та кінетика псевдоспін-ферміонних моделей локально-ангармонічних кристалічних і молекулярних систем з сильними хаббардівськими кореляціями" (1999–2001 рр., номер державної реєстрації 0199U000670), "Розробка сучасних теоретичних методів та їх застосування до вивчення властивостей конденсованих систем" (2002–2006 рр., номер державної реєстрації 0102U001794), "Дослідження колективних іонних та електрон-іонних процесів у твердих тілах на основі ферміонних ґраткових моделей" (2002–2004 рр., номер державної реєстрації 0102U000217), "Розвиток аналітичних методів теорії енергетичного спектру та динаміки сильнокорельованих систем частинок" (2005–2007 рр., номер державної реєстрації 0105U002085), "Розвиток і застосування методів аналітичної теорії та комп'ютерного експерименту для опису явищ переносу в іон-електронних системах" (2007–2011 рр., номер державної реєстрації 0107U002081), "Моделювання фізичних властивостей квантових ґраткових систем з сильними багаточастинковими кореляціями" (2008–2012 рр., номер державної реєстрації 0108U001154), "Квантові багаточастинкові ґраткові системи: динамічний відгук і ефекти сильних кореляцій" (2013–2017 рр., номер державної реєстрації 0112U007761), а також: проекту "Багатомасштабність і структурна складність конденсованої речовини: теорія і застосування" (2012–2016 рр., номер державної реєстрації 0112U003119), "Класичні та квантові системи за межами стандартних підходів: електродинаміка у просторах вищої вимірності" (2015 р., номер державної реєстрації 0115U004838; 2016 р., номер державної реєстрації 0116U005055).

Дисертаційна робота складається зі вступу, шести розділів (перший містить огляд літератури, наступні з викладом результатів оригінальних досліджень), висновків, списку цитованих джерел, додатків і становить 378 сторінок тексту.

У **першому розділі** подано огляд відомих підходів до проблеми релятивістського опису зв'язаних станів кількох частинок із застосуваннями у спектроскопії субатомних та гадронних систем. Згадуються рівняння Брейта, Бете-Салпітера, квазі-потенціальні та інші – досить великий, хоч і не повний список, вказано їх недоліки та переваги. Замість цих традиційних підходів, автор опирається на інший – пов'язаний не з квантовою, а з класичною теорією поля. Це дозволяє вийти за межі пертурбативного розгляду, послабити жорсткі вимоги перенормовності, і цим розширити клас взаємодій для опису субатомних систем.

Вихідним пунктом, як і в традиційних підходах, є лагранжева дія системи частинок, взаємодія яких передається електромагнітним чи іншим релятивістським полем. Якщо змінні цього поля редукувати безпосередньо у вихідній дії, то вона стане функціоналом лише змінних частинок, але набуде доданків із подвійними інтегралами, що містять симетричну функцію Гріна – інтегралами типу Тетраде-Фоккера, характерними для електродинаміки Вілера-Фейнмана. Така динаміка є нелокальною у часі – її важко перекласти на гамільтонівську мову, а тим більше проквантувати. Дотепер застосування формалізму Фоккера обмежувалися лише слабо релятивістським наближенням та простими одновимірними моделями. У даній дисертації розвиваються нові можливості квантування часо-нелокальних систем, придатні для випадку сильного зв'язку.

У **другому розділі** дисертації часо-асиметрична електромагнітна взаємодія, вперше введена в моделі Старушкевича-Рудда-Гілла, була узагальнена на широкий клас інших релятивістських взаємодій. Вони формулюються у термінах точних розв'язків рівнянь Даламбера з точковими джерелами – потенціалів Льенара-Віхерта та їх узагальнень на інші поля. Тому системи частинок з часо-асиметричною взаємодією є точно пуанкаре-інваріантними, і мають відповідні інтеграли руху. Основна їх перевага – можливість зведення фоккерівського інтегралу дії до лагранжевого вигляду, а далі – до гамільтонового опису. Для квантування автор застосовує метод динамічної алгебри, в рамках якого зберігається явна коваріантність квантового опису. Для випадків скалярної та векторної взаємодій кулонівського типу отримані спектри тотожні до результатів для безспінових частинок, раніше отриманих у рамках інших підходів, базованих на квантовій теорії поля. Але отримано і узагальнення на випадок гравітаційної взаємодії та гіпотетичних тензорних взаємодій вищих рангів. Цікавим є евристичне врахування спінових поправок та відповідні точно інтегровані рівняння квазіпотенціального типу.

Релятивістська кваркова модель мезонів типу Фоккера в літературі була відома лише у класичному варіанті. У **третьому розділі** дисертант, по-перше, показав, що вона пов'язана з теорією поля з вищими похідними, що ефективно застосовувалася для опису конфайнменту. По-друге, в дисертації цю модель проквантовано із застосуванням ланцюгових дробів і отримано спектри мас мезонів різних сімейств, що узгоджуються з експериментом. По-третє, автор доповнив векторну взаємодію скалярною таким чином, щоб модель набула універсального характеру. Для її квантування дисертант застосував наближення майже колових орбіт та нетривіальний гамільтонів опис нелокальних у часі систем. Цей метод у **четвертому розділі** автор розвиває у загальному вигляді, застосовному як до релятивістських, так і нерелятивістських систем типу Фоккера.

П'ятий і шостий розділи присвячені розвитку частково редукованої теорії поля -- теоретико-польовому аналогу формалізму типу Фоккера. Перехід від частково-редукованої лагранжевого до гамільтонового опису можна здійснити лише в рамках деякої апроксимаційної схеми. Розвиваються дві схеми. У **п'ятому розділі** часова нелокальність усувається безпосередньо в редукованому лагранжіані та в інтегралах руху -- в рамках квазірелятивістських наближень (з допомогою розкладів за запізненням, тобто за оберненою швидкістю світла). Ця схема приводить до кількочастинкових хвильових рівнянь в координатному представленні. Для апробації методу його застосовано до спіornoї частково редукованої електродинаміки, отримано відоме рівняння Брайта, здійснено його непертурбативний аналіз та обчислено спектр парапозитронію. Підхід допускає можливість вибору чи модифікації міжчастинкової взаємодії на випадки скалярної, псевдо-скалярної, векторної, тензорної та інших взаємодій, що ефективно використовуються в ядерній та гадронній фізиці. Для аналітичного дослідження зв'язаних станів двоферміонної системи запропоновано блок-матричне формулювання радіально редукованого двочастинкового рівняння Дірака і розвинуто псевдо-пертурбативний метод, що ґрунтується на техніці розкладів за оберненим повним моментом імпульсу системи. Метод застосовний у задачах із сильним зв'язком, і дозволяє обійти труднощі, пов'язані з існуванням нефізичних сингулярностей двочастинкового рівняння Дірака. Для ілюстрації методу аналізуються двочастинкові рівняння Дірака з різними скалярно-векторними суперпозиціями кулонівського та лінійного потенціалів, деякі із розглянутих прикладів можуть бути основою універсальних релятивістських

потенціальних моделей. В дисертації запропоновано клас нових точно розв'язних двочастинкових рівнянь Дірака з комбінаціями потенціалів лінійного і кулонівського типу із складною спін-кутовою залежністю. Цей клас містить відомі діраківські осцилятори, а також включає нові приклади. Один із них, з досить нетривіальним потенціалом, точно відтворює бажане спін-орбітальне виродження траєкторій Редже.

Інша схема виведення кількочастинкових хвильових рівнянь із редукованих теоретико-польових лагранжіанів полягає в усуненні часової нелокальності на рівні гамільтонового опису, з подальшим застосуванням канонічного квантування та варіаційного методу. У **шостому розділі** дисертації ця схема реалізується шляхом запропонованого тут алгоритму розкладів за константою взаємодії. Варіаційні хвильові рівняння формулюються в імпульсному представленні і нагадують інтегральні рівняння Салпітера з ядрами, вираженими через пропагатори полів-посередників або фур'є-образи феноменологічних форм-факторів взаємодії. Відмінність від стандартної КТП полягає у тому, що у редукованій теорії немає вільних квантів поля-посередника. Тому варіаційні стани кількох взаємодіючих частинок є простішими, ніж у традиційній КТП, а пертурбативні розклади проводяться не за константою взаємодії, а за її квадратом. Все це дозволяє вже у 1-му наближенні отримати варіаційні кількочастинкові рівняння з нетривіальною взаємодією, уникаючи ультрафіолетові розбіжності. Схема застосовується до скалярної моделі Юкави, у якій скалярні частинки (та античастинки) взаємодіють через масивне чи безмасове скалярне поле. Передбачено можливість обчислення 2-го і вищих наближень, але ця технічно складна задача виходить за рамки дисертації. Натомість розглядається частково редукована модель Юкави з медіатором уявної маси -- тахіонним полем, яке не має повноцінного квантового втілення в рамках локальної КТП. В підрозділі 6.3 лагранжіан моделі Віка-Куткоського (тобто моделі Юкави з безмасовим полем-посередником) доповнено нелінійними членами. У наближеннях нижніх порядків теорії ϕ^3 отримано звичні дво-точкові взаємодії та три-точкову взаємодію. Остання у статичній границі описується три-точковим кластерним потенціалом логарифмічного росту, зведеним після регуляризації до квадратури. Цей же результат отримано без наближень для версії дипольної моделі. Обидві моделі можуть мати стосунок до проблеми конфайнмента. В останньому підрозділі 6.4 процедура редукції калібрувального поля-посередника ітераційно застосовано до спінорної хромодинаміки. У такий спосіб можливо отримати вищі наближення до короткосяжної взаємодії кварків у координатному представленні. У 1-му наближенні поряд із взаємодією одноглюонного обміну виникає взаємодія, що описується похідною від тричастинкового кластерного потенціалу, отриманого в рамках нелінійних модифікацій моделі Віка-Куткоскі та дипольної. У 2-му наближенні з'являється 4-частинковий потенціал. При великих відстанях обидва потенціали мають кулонівські асимптотики.

Оцінюючи дисертацію в цілому, зазначу, що в ній отримані нові науково обґрунтовані результати, що дозволяють будувати квантовий релятивістський опис системи двох чи скінченного числа частинок, зокрема формулювати і розв'язувати задачу про зв'язані стани. Основою підходу є інтеграли дії типу Фоккера або частково редуковані нелокальні лагранжіани, одержані шляхом усунення поля, що є переносником взаємодії у вихідному локальному описі системи. Головною методичною проблемою, розв'язаною у дисертації, є конструктивна побудова на цій основі гамільтонових описів систем та їх квантування. Розвинуті загальні методи

застосовано до опису двочастинкових і тричастинкових систем, що представляють фізичний інтерес, зокрема кваркових моделей мезонів та баріонів.

В той же час вважаю за необхідне зробити наступні зауваження:

Задекларована у назві дисертації «...релятивістична квантова задача кількох тіл» передбачає не тільки опис зв'язаних станів, але і станів розсіяння. Отримані дисертантом релятивістські рівняння двох частинок повинні допускати такі розв'язки. Але задачі розсіяння тут зовсім не розглядаються. Цікавим, наприклад, був би непертурбативний опис пружнього розсіяння в рамках двочастинкового рівняння Дірака – ця тема ще мало вивчена.

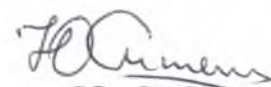
Запропоновий в пп. 2.3.5–2.3.7 метод врахування спінових ефектів в рамках часо-асиметричних моделей не застосовний до S-станів, а отже – до основних станів двочастинкових системи. Це знижує фізичну вартість методу, і його слід було б поширити і на основні стани, оскільки вони важливі для порівняння моделей з експериментом та іншими теоріями.

Але ці зауваження мають скоріше характер побажань та не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Розвинуті у дисертації аналітичні методи та виконані дослідження відповідають спеціальності 01.04.02. Основні результати дисертації опубліковані в 24 статтях в міжнародних та вітчизняних журналах, що належать до списку журналів, у яких мають бути опубліковані матеріали дисертаційних досліджень зі спеціальності групи 01.04 – фізика. Усі викладені в дисертації оригінальні результати отримані за безпосередньої участі здобувача. Автореферат дисертації повністю відображає її зміст.

Вважаю, що дисертаційна робота “Лагранжіани з часовою нелокальністю і релятивістична квантова задача кількох тіл” задовольняє усім вимогам “Порядку присудження наукових ступенів”, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 року № 567, а її автор Аскольд Андрійович Дувіряк безумовно заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук зі спеціальності 01.04.02 – теоретична фізика.

Офіційний опонент
доктор фізико-математичних наук, професор


Ю. О. Ситенко

1 вересня 2017 р.

Підпис доктора фізико-математичних наук професора Ю. О. Ситенка засвідчую

Вчений секретар Інституту теоретичної
фізики ім. М. М. Боголюбова
Національної Академії наук України
кандидат фізико-математичних наук




С. М. Перепелиця