

**ВІДГУК**  
**офіційного опонента**  
**на дисертаційну роботу Дувіряка Аскольда Андрійовича**  
**“Лагранжіани з часовою нелокальністю і релятивістична**  
**квантова задача кількох тіл”**,  
**представленої на здобуття наукового ступеня доктора**  
**фізико-математичних наук за спеціальністю**  
**01.04.02 – теоретична фізика**

Дисертаційна робота А.А. Дувіряка “Лагранжіани з часовою нелокальністю і релятивістична квантова задача кількох тіл” присвячена проблемі побудови квантового опису релятивістських систем 2-х і 3-х частинок на основі формалізму інтегралів дії типу Фоккера. Оскільки інтеграли дії типу Фоккера пов'язані з класичною теорією поля, то запропонований підхід є проміжним між цілком феноменологічними описами релятивістської задачі кількох тіл і підходами, що базуються на квантовій теорії поля: рівнянні Бете-Салпітера, квазіпотенціальних рівняннях тощо. Побудова такого квантового опису релятивістських системи кількох частинок є актуальною з кількох причин. По-перше, квантова теорія поля (КТП) є описом істотно нескінченного числа частинок і послідовно формулюється як пертурбативна теорія розсіяння. Для формулювання задачі на зв'язані стани кількох тіл в рамках КТП необхідні ті чи інші наближення, що приводять до загалом різних результатів. Тому важливо мати підхід, незалежний від КТП. По-друге, лише фундаментальні взаємодії (і то не всі) – електромагнетна, слабка і частково сильна – допускають послідовний опис у рамках КТП. Взаємодії між кварками в гадронах, композитних частинок (нуклонів, ядер, атомів) між собою важко (або й неможливо) вивести з перших принципів, але можна описати в рамках ефективних теорій поля, що не передбачають послідовної процедури перенормування, але базуються на класичних теоретико-польових лагранжіанах. Запропонований у дисертації підхід застосовний до таких випадків. Його можна розглядати як напів-феноменологічний підхід, в якому властивості взаємодій частково узгоджені з фундаментальними принципами (варіаційним, інваріантності тощо), а частково задаються феноменологічно.

Інтеграли дії типу Фоккера отримуються шляхом редукції поля-посередника взаємодії у вихідній дії системи точкових частинок матерії. Якщо ж матерію описувати діраківськими або скалярними полями, то подібна процедура редукції приводить до дії з частково редукованим теоретико-польовим лагранжіаном, нелокальним у часі. Головною методичною проблемою, яка постала перед дисертантом, є конструктивна побудова гамільтонових описів систем, заданих фоккерівськими інтегралами або лагранжіанами з часовою нелокальністю, та

їх квантування. У дисертації застосовано чотири наближені методи для розв'язання цієї проблеми: наближення часо-асиметричної взаємодії, наближення майже колових орбіт (або розкладів за  $1/\ell$ ), квазірелятивістичних наближень (або розкладів за  $1/c$ ), і розкладів за константою взаємодії. Розвинуті загальні методи застосовано до опису двочастинкових і тричастинкових систем, що становлять фізичний інтерес, зокрема кваркових моделей мезонів та баріонів.

Система двох заряджених частинок, у якій перша частинка діє на другу запізненим полем, а друга на першу – випередним, в літературі розглядалася як цікавий приклад з класичної релятивістської механіки, що допускає лагранжів і гамільтонів опис, і є інтегровним. Дисертант детально аналізує цю модель та її аналог із скалярною взаємодією, і показує, що такі часо-асиметричні взаємодії в багатьох аспектах є добрим наближенням до реалістичних запізнених взаємодій. В **другому розділі** запропоновано широкий клас часо-асиметричних моделей із взаємодіями, що переносяться релятивістськими полями довільного цілого спіну. 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. Отримано й узагальнення на випадок гравітаційної взаємодії та гіпотетичних тензорних взаємодій вищих рангів. Цікавим є евристичне врахування спінових поправок та відповідні точно інтегровні рівняння квазіпотенціального типу.

Ще один приклад – часо-асиметричний аналог кваркової моделі мезонів типу Фоккера, що в літературі була відома лише у класичному варіанті. У **третьому розділі** дисертант, поперше, показав, що модель пов'язана з теорією поля з вищими похідними, що ефективно застосовувалася для опису конфайнменту. По-друге, в дисертації цю модель проквантовано, і отримано спектри мас мезонів різних сімейств, що узгоджуються з експериментом. По-третє, автор доповнив векторну взаємодію скалярною. 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 релятивістичних, так і нерелятивістичних систем типу Фоккера.

**П'ятий і шостий розділи** роботи присвячена розвитку частково редукованої теорії поля (ЧРТП) -- теоретико-польовому аналогу формалізму типу Фоккера. Тут для різних теоретико-польових систем будуються частково редуковані (ЧР) лагранжіани із часовою нелокальністю, вивчаються їх симетрійні властивості та збережні величини, здійснюється

перехід до гамільтонового опису та квантування, і виводяться хвильові рівняння для кількочастинкових станів.

У **п'ятому розділі** часова нелокальність усувається безпосередньо в редукованому лагранжіані та інтегралах руху – в рамках квазірелятивістичних 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 спіновної ЧР-електродинаміки, отримано відоме рівняння Брайта, здійснено його непертурбативний аналіз та чисельно отримано спектр парапозитронію. Підхід допускає можливість вибору чи модифікації міжчастинкової взаємодії на випадки скалярної, псевдо-скалярної, векторної, аксіальної, тензорної та інших взаємодій. Для аналітичного дослідження зв'язаних станів двоферміонної системи запропоновано блок-матричне формулювання радіально редукованого 2ЧРД, і розвинуто псевдо-пертурбативний метод, що ґрунтується на техніці розкладів за параметром  $1/j$  - числом, оберненим до повного моменту імпульсу системи. Метод застосовний у задачах із сильним зв'язком, і дозволяє обійти труднощі, пов'язані з існуванням нефізичних сингулярностей 2ЧРД. Для ілюстрації методу аналізуються 2ЧРД з різними скалярно-векторними суперпозиціями кулонівського та лінійного потенціалів, деякі із розглянутих прикладів можуть бути основою універсальних релятивістичних потенціальних моделей. Щодо точно розв'язних моделей в рамках 2ЧРД, то в літературі відомо лише кілька прикладів. В роботі запропоновано клас нових точно розв'язних 2ЧРД із 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 спін-орбітальне виродження траєкторій Редже.

Іншу схему виведення кількочастинкових хвильових рівнянь із редукованих теоретико-польових лагранжіанів запропоновано в **шостому розділі**. Вона полягає в усуненні часової нелокальності на рівні гамільтонового опису, з подальшим застосуванням канонічного квантування та варіаційного методу. Ця схема реалізується шляхом запропонованого тут алгоритму розкладів за константою взаємодії. Варіаційні хвильові рівняння у ній формулюються в імпульсному представленні й 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 дає змогу вже у першому 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 другого і вищих наближень, але ця технічно складна задача виходить за рамки дисертації. Натомість розглядаються моделі, що не має повноцінного квантового втілення в рамках локальної КТП, зокрема ЧР-модель Юкави з медіатором уявної маси – тахіонним полем. В підрозділі 6.3 лагранжіан моделі Віка-Куткоського (тобто моделі Юкави з без масовим полем-посередником) доповнено нелінійними членами. У наближеннях нижніх порядків теорії  $\phi^3$  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 першому 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 другому наближенні з'являється 4-частинковий потенціал. При великих відстанях обидва потенціали мають кулонівські асимптотики.

Робота не позбавлена певних недоліків. Основний з них полягає у значному акцентуванні на технічних деталях підходу. Наприклад, в п. 2.2.1 занадто деталізується динаміка часо-асиметричних моделей із векторною та скалярною взаємодіями, особливо нефізичні розв'язки цих моделей.

Доцільно було б вказати на можливе фізичне застосування моделей із тензорною взаємодією вищих рангів.

Запропонована у шостому розділі схема побудови гамільтоніану для нелокальних лагранжіанів у теорії поля реалізується на багатьох прикладах, але лише в першому наближенні. Натомість зовсім не розглядається друге наближення, важливе для перевірки застосовності схеми в цілому.

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 видань, 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.

Важая, що дисертаційна робота "Лагранжіани з часовою не локальністю 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 за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

Доктор фіз.-мат.наук, провідний науковий співробітник Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України



Р.М. Пляцко

Підпис Р.М. Пляцка засвідчую:

Вчений секретар Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України кандидат фіз.-мат. наук



В.О. Міщенко

1.09.2017 р.