

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Гнатенко Христини Павлівни “Вплив квантованості простору на властивості класичних і квантових систем”, подану на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика

Попри значні успіхи загальної теорії відносності та квантової теорії поля, в останні кілька десятиліть все гостріше відчувається потреба у розвитку об'єднавчих схем, які б у кінцевому підсумку привели до творення нової теорії квантової гравітації. Більшість із цих схем, які зараз активно розвиваються, передбачають існування деякого природного масштабу, при якому очікується кардинальна зміна властивостей простору-часу. Це, в свою чергу, стимулює пошук різноманітних сценаріїв переходу до фізики на масштабах Планка (системи фізичних одиниць, що була запропонована Планком і буде виявлено через комбінації фундаментальних фізичних сталах, а саме гравітаційної сталої, швидкості світла, сталах Планка і Больцмана). Як відомо, існує кілька підходів до квантування гравітації, серед яких, зокрема, такі як теорія струн та петлевая квантова гравітація, однак єдиної позиції тут досі немає. Одним із головних стримуючих факторів на шляху до творення загальної теорії квантування гравітації виступає відсутність надійних спостережень, що дозволили б перевірити ті чи інші передбачення. Водночас зрозуміло, що ефекти квантової гравітації можуть проявлятися на усіх масштабах – від мікрокопічних і до масштабів Всесвіту, тому актуальним завданням теорії залишається дослідження впливу відповідних ефектів, вивчення їх проявів на фізичних властивостях окремих об'єктів і пропозиція нових експериментів, які б дали змогу відповісти на ключові питання. Один із цікавих підходів до вирішення такої фундаментальної проблеми базується на ідеї деформації комутаційних співвідношень квантової механіки, що, очевидно, впливає на властивості відповідних систем і зумовлює, зокрема, появу таких нових понять як «мінімальна довжина». Для опису особливостей структури простору на планківських масштабах було запропоновано чимало версій такого типу деформацій, які відповідають певним просторам із некомутативною алгеброю.

У дисертаційній роботі Гнатенко Христини Павлівни “Вплив квантованості простору на властивості класичних і квантових систем” розглянуто низку фундаментальних задач, що стосуються: аналізу різних квантованих просторів і впливу алгебри деформацій на властивості фізичних систем, зокрема в частині вибору тих класів деформацій, котрі не порушують певні фундаментальні принципи і закони; вивчення та аналізу проявів деформацій на рівні комутаційних співвідношень чи дужок Пуассона і впливу особливостей структури простору на планківських масштабах на особливості поведінки мікро- та макро-об'єктів; оцінок параметрів некомутативності та, відповідно, мінімальних дисперсій для координат чи імпульсів, для різних типів деформацій; а також прояву деформацій на рівні уже статистичних властивостей багаточастинкових систем, зокрема в частині вивчення

нулів статистичної суми бозе-газу в квантованому просторі та аналізу можливостей експериментального спостереження нулів Лі-Янга та нулів Фішера.

Структурно дисертація складається з вступу, семи розділів основного тексту, висновків, списку літератури з 299 позицій та додатку зі списком публікацій за темою дисертації і переліком конференцій, де доповідалися отримані результати.

У **першому розділі** проаналізовано основні типи деформацій комутаційних співвідношень або ж, іншими словами, основні типи некомутативних алгебр (канонічного типу, у яких комутатори рівні константам; типу Лі з лінійними залежностями комутаторів від координат та імпульсів; та нелінійними), що досліджуються далі у роботі.

У **другому розділі** досліджується рух макротіла у просторах з нелінійною деформацією комутаційних співвідношень для координат та імпульсів (простори з алгебрами Снайдера та Кемпфа). Тут, зокрема, встановлено умови на параметри деформації, за яких виконуються вимоги адитивності і незалежності від композиції для кінетичної енергії, відновлюється слабкий принцип еквівалентності, а координати не залежать від маси та можуть розглядатися як кінематичні змінні. Показано, що для цього параметри деформації мають залежати від мас частинок.

У **третьому розділі** вводиться концепт мінімальної довжини з відповідним аналізом цієї величини у некомутативному фазовому просторі канонічного типу. Тут досліджено вплив некомутативності імпульсів на траєкторію руху вільної частинки та проаналізовано особливості руху системи вільних частинок у квантованому фазовому просторі канонічного типу. Запропоновано означення імпульсу центра мас, який є інтегралом руху. Показано, що некомутативність імпульсів зумовлює дискретність спектру центра мас системи. Розраховано спектр власних значень для системи з осциляторною взаємодією та знайдено розв'язок задачі про вільне падіння тіла у гравітаційному полі. Досліджено вплив некомутативності на зсув перигелію Меркурію та отримано оцінки для параметрів координатної та імпульсної некомутативностей на основі порівняння теоретичного результату із експериментальними даними. Досліджено виконання принципу еквівалентності для Землі та Місяця у гравітаційному полі Сонця.

У **четвертому розділі** аналізуються питання щодо відображення симетрії типу інверсія часу чи сферична симетрія у некомутативному фазовому просторі канонічного типу. Тут, зокрема, розглянуто задачу про рух частинки по колу та показано, що період руху залежить від його напрямку. Досліджено перетворення для некомутативних координат та некомутативних імпульсів при інверсії часу. Встановлено, що ці перетворення залежать від представлення. На основі ідеї про залучення додаткових імпульсів, які пов'язані з додатковими осциляторами, побудовано інваріантну відносно інверсії часу, сферично-симетричну некомутативну алгебру, яка є еквівалентна до некомутативної алгебри канонічного типу.

П'ятий розділ присвячений розгляду задач у сферично-симетричному некомутативному просторі канонічного типу. Отримано вирази для мінімальних

дисперсій координати та імпульсу у такому просторі, що пов'язують їх з параметрами некомутативності. Для задачі про систему двох частинок із кулонівською взаємодією в рамках ефективної теорії збурень розраховано спектри власних значень. Ці результати використано для аналізу впливу некомутативності на спектри атома водню, мюонного атома водню та антіпротонного гелію. Вказано, що експериментальні дослідження спектру антіпротонного гелію відкривають нові перспективи для покращення оцінок для так званої мінімальної довжини. Розглянуто низку задач, що стосуються систем із осциляторними взаємодіями та встановлено як некомутативність впливає на частотний спектр. Отримано рівняння руху для квантової та класичної частинок в гравітаційному полі та запропоновано вирази для тензорів некомутативності, при яких відновлюється слабкий принцип еквівалентності.

У **шостому розділі** вивчаються системи багатьох частинок у просторах із некомутативними алгебрами типу Лі. Отримано вирази для комутаторів фазових змінних, що описують рух центра мас, і знайдено умови на параметри некомутативності, при яких некомутативна алгебра для координат та імпульсів центра мас також відповідає некомутативній алгебрі типу Лі, а дужка Пуассона координат центра мас і відносного руху стає рівною нулеві, тобто ці рухи розділяються. Проаналізовано проблему порушення слабкого принципу еквівалентності для задачі про рух тіла у гравітаційному полі. Проведено узагальнення отриманих результатів на випадок алгебри з деформацією кручення.

На відміну від інших розділів, де йшлося про вплив некомутативності на класичну або ж квантову динаміку однієї чи кількох частинок, у **с'юомому розділі** розглядається проблема про вплив некомутативності на суттєво багаточастинкову систему з акцентом на її статистичні властивості. Тут досліджується газ бозе-частинок із так званими q -деформованими комутаційними співвідношеннями для операторів породження та знищення, що відповідають нелінійній алгебрі з мінімальною довжиною та мінімальним імпульсом. Досліджено кореляційні функції такої системи та встановлено зв'язок нулів цих функцій з нулями статистичної суми при комплексній температурі (так звані нулі Фішера). Показано, що уявна частина комплексної температури виникає саме через квантованість простору. Оскільки кореляційні функції можна спостерігати експериментально, то отриманий результат відкриває цікаві перспективи для спостереження поведінки нулів Фішера. У цьому ж розділі встановлено також зв'язок нулів кореляційних функцій із нулями статистичної суми (нулями Лі-Янга) для бозе-газу з ефективною взаємодією типу Бозе-Хаббарда та для випадку спінових систем.

На підставі результатів проведених досліджень автор дисертації сформулювала загальні висновки, які в короткій формі повністю відображають обсяг виконаної роботи.

Актуальність виконаних досліджень не викликає жодного сумніву. Для доповнення аргументів уже приведених вище, можна вказати, що за даними

SCOPUS в період з 2000-2019 рік було опубліковано більше 830 статей, у яких гасло «noncommutative space» зустрічалося у назві, анотації чи списку ключових слів. Автором 11 публікацій із цього списку є Христина Гнатенко, а одна із її одноосібних робіт цитувалася понад 30 разів. Загалом Х.П.Гнатенко автор 23 статей, що містять основні результати цієї дисертації, переважна більшість з яких (18) опублікована в авторитетних міжнародних журналах (Europhys. Lett., Mod. Phys. Lett. A, Phys. Lett. A, Phys. Rev. A та ін.).

Про достовірність отриманих результатів і наукову обґрунтованість висновків свідчать як численні апробації у вигляді виступів на багатьох конференціях, список яких приведено в додатку до дисертації, так і те, що при виконанні досліджень використовувалися відомі методи та підходи, які належать до базових у сучасній теоретичній фізиці.

Дисертаційна робота виконана відповідно до планів науково-дослідної роботи кафедри теоретичної фізики Львівського національного університету імені Івана Франка за шістьма держбюджетними темами, повний перелік яких приведено в автoreфераті та дисертації.

Матеріали дисертаційної роботи гарно представлені, мова дисертації чітка, а виклад лаконічний і зрозумілий. Х.П.Гнатенко отримала чимало цікавих і важливих результатів. Водночас, в процесі ознайомлення з роботою виникло декілька запитань і зауважень, зокрема:

1. Ідея про деформацію комутаційних співвідношень як спосіб виходу на планківські масштаби має право на існування. При цьому деформовані співвідношення могли б розглядатися як свого роду наслідок спрощення теорії вищого рівня ієархії (скажімо теорії квантової гравітації), що описує квантові та гравітаційні явища на планківських відстанях. Звісно, що нам важко судити про тип «правильної» деформаціїaprіорі. З формальної точки зору, можна обмежити себе вивченням таких деформацій, котрі не надто «зіпсують» звичну нам фізику. Такий підхід використовується у цій роботі. Інший варіант, вважати, що деформації можуть бути загального характеру, але важливим для нас є лише те, що, з одного боку, в границі, коли вони зникають, відтворювалася звична нам фізика, а з іншого, вплив малих деформацій не повинен призводити до якісних змін у системі, що мають необоротній характер. І тут виникає питання, чи дійсно як критерії щодо вибору параметрів деформацій (чи у більш загальному формулюванні вибору певних типів алгебр) можуть обиратися міркування про збереження певних фундаментальних принципів чи закономірностей? На підставі чого ми можемо стверджувати, що для деформованих співвідношень мають виконуватися тотожності Якобі? Чи досить того, що виконується слабкий принцип еквівалентності, а з іншого боку порушується закон збереження повного імпульсу або ж енергії? І таке інше.

2. Ціла низка важливих результатів, отриманих у цій дисертації, стосується того, що параметри деформацій у різних алгебрах мали б залежати від маси частинок, а отже комутаційні співвідношення повинні змінюватися залежно від задачі, яку ми розглядаємо. Тобто, для опису електронів, атомів чи макротіл маємо користуватися схожими по формі, але різними у практичній реалізації комутаційними співвідношеннями. На цьому, зокрема, базувалися різні оцінки, що були отримані для параметрів некомутативності з використанням експерименту з вивчення зміщення перигелію Меркурію. Як можна проінтерпретувати фізично таку специфічну вимогу щодо залежності коефіцієнтів некомутативності від маси? Чи може тут існувати певний зв'язок із загальною теорією відносності?
3. Важливе питання, на яке не цілком запропоновано відповідь у дисертації, стосується зв'язку глобальних симетрій певних задач квантової чи класичної механіки з тими наслідками, що з них слідують. Найвідоміший тут приклад – це знаменита теорема Нетер. Для прикладу, симетрія щодо інверсії часу, має своїм наслідком обертість на рівні законів механіки. Відомо, що Т-симетрія або ж обертість може порушувати при слабких взаємодіях. То чи можемо ми очікувати, що джерелом виникнення необоротності на рівні механіки можуть бути також гравітаційні ефекти, що призводять до деформації комутаційних співвідношень, які, в свою чергу, не зберігають симетрії часової інверсії?
4. Ще одне питання виникає при аналізі задач про систему вільних частинок у комутованих просторах. Як слідує з численних прикладів, що детально розглядалися у дисертаційній роботі, якщо така система описується комутаційними співвідношеннями з деформаціями, то фактично мова йде про опис еквівалентної їй системи частинок із певними ефективними взаємодіями у просторі зі звичними (недеформованими) комутаційними співвідношеннями. Чи робилися спроби системного аналізу основних типів ефективних взаємодій, що виникають від різновидів некомутативних алгебр, які розглядалися у дисертаційній роботі? З іншого боку, цікавою є і обернене формулювання цього питання. Так, відомо, що релятивістична механіка може бути представлена як механіка вищих похідних. То чи можна послідовно в рамках теорії збурень за степенями $1/c$, де c – це швидкість світла, представити відповідні деформації для дужок Пуассона і будувати опис в рамках механіки Ньютона з деформованими дужками Пуассона?

Певні зауваження виникли також на рівні вживаної термінології чи при читанні тексту дисертації або ж автореферату:

- Не дуже вдалим, на мою думку, є термін «деформовані алгебри». Може краще алгебри деформацій? Бо чи є алгебра здеформованою?
- Не переконливим виглядає також поняття про «мінімальну довжину». Практично скрізь йдеться про оцінки дисперсій у вимірах координат чи

імпульсів. «Мінімальна довжина» в такому випадку означає певну статистичну флюктуаційну межу, за якою практично неможливо розрізняти координати двох сусідніх точок. Окрім того, якщо дійсно говорити про існування означеної мінімальної довжини, то можуть виникнути проблеми у розумінні певних типів перетворень, зокрема не зрозуміло як означити перетворення Лоренца для такого простору.

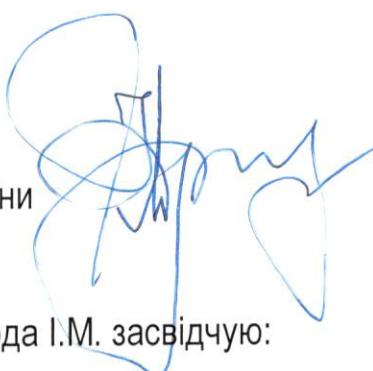
- Попри майже ідеальний виклад матеріалу, зустрічаються все ж у дисертації деякі хиби чи описки («найбільш чутливих» замість «найчутливіших», с. 30; пропущені коми, с. 30, 56 і т.д.; «переобчислено екстремально малу оцінку для мінімальної довжини», а що це?, с.56; не надто вдалі позначення для індексів у розділі 3; тощо).

Водночас, хочу зазначити, що згадані вище зауваження не впливають на загальну високу оцінку дисертаційної роботи. Проведені у дисертації дослідження відповідають спеціальності 01.04.02 – теоретична фізика. Основні результати опубліковані у 23 статтях у фахових журналах, що належать до списку видань, де слід публікувати результати дисертаційних досліджень із спеціальностей групи 01.04 – фізики. Усі результати отримані за безпосередньої участі Х.П.Гнатенко, а 6 із її статей є одноосібними. Автореферат дисертації повністю відображає її зміст.

Вважаю, що дисертаційна робота “Вплив квантованості простору на властивості класичних і квантових систем” є завершеною науковою працею і задовільняє усім вимогам «Порядку присудження наукових ступенів», що затверджений постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 4 липня 2013р., а її автор, Христина Павлівна Гнатенко, вповні заслуговує на присвоєння їй наукового ступеня доктора фізико-математичних наук зі спеціальності 01.04.02 – теоретична фізика.

Офіційний опонент:

доктор фіз.-мат. наук,
академік НАН України,
директор Інституту фізики
конденсованих систем НАН України



I.M.Мриглод

Підпис акад. НАН України Мриглода I.M. засвідчує:

Заст. директора з наукової роботи
ІФКС НАН України

