

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу **Назаренка Андрія Володимировича** “Статистичні властивості систем із сильною взаємодією та ефекти гравітації”, подану на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

Дисертаційна робота Назаренка А.В. присвячена дослідженняю важливих задач теоретичної фізики пов’язаних з описом властивостей речовини як функції температури, густини та складу. Для розв’язання цієї задачі використовується рівноважна статистична фізика, яка має справу з системами багатьох частинок із сильною та гравітаційною взаємодіями. Такі системи інтенсивно досліджуються експериментально в зіткненнях ядер з ядрами при високих енергіях на сучасних прискорювачах, наприклад, на Релятивістському колайдері важких іонів (RHIC, Брукхейвен, США) і на Великому адронному колайдері (LHC, Женева, Швейцарія). Актуальною проблемою в астрофізиці є такий таємничий об’єкт, як темна матерія. Постає задача про одночасний прояв сильної і електромагнітної взаємодій, та виявлення значущих ефектів. Системи частинок із сильною і гравітаційною взаємодіями за певних умов можуть проявляти спільні риси макроскопічної поведінки, які доцільно зробити предметом цілісного дослідження.

Колаборації в США і Європі експериментально підтвердили можливість опису розпаду збуджених ядер як фазовий перехід рідина-газ. Це підштовхнуло до пошуку рідкої і газоподібної фаз і в інших системах з сильною взаємодією. Окрім цього, експериментально знайдений конденсат Бозе–Ейнштейна в атомарних системах, і більш того, в деяких роботах темна матерія має бозе-конденсатне походження. Це стимулювало дисертанта к пошуку конденсату піонів в ядро-ядерних зіткненнях, ідея якого була розвинута в роботах авторів Д.Н. Воскресенський, J.D. Bjorken, E.V. Shuryak і інші. Варто відзначити і можливу частинку-кандидата у такій моделі темної матерії – аксіон, – існування якої передбачено в роботах R. Peccei, H. Quinn, F. Wilczek, S. Weinberg, для вирішення проблеми відсутності СР порушення у сильній взаємодії. Поєднання відзначених ідей створює перспективу для виявлення рідкого і газоподібного станів, а також фазових переходів в системах піонів і темній матерії.

Важливою задачею також є реалістичний опис речовини в зіткненнях важких іонів при високих енергіях, коли проявляється кваркова структура адронів. Поетапний опис станів речовини може допомогти відтворити повну картину зіткнення, узгоджену з експериментом. Так, домінуючі на ранній стадії партонні процеси обумовлюють початкові умови подальшої еволюції.

Тому, вони повинні впливати, що потребувало перевірки в дисертації, на розв'язання загадки НВТ (R. Hanbury Brown, R.Q. Twiss), з якою стикнулися перші експерименти колаборації STAR на RHIC.

Відсутність експериментального підтвердження теорії суперструн зумовлює інші підходи до вивчення сумісного прояву гравітаційної і сильної взаємодій зокрема. Така альтернатива з'явилася наприкінці 90-х років завдяки моделі великих додаткових вимірів – ADD (N. Arkani-Hamed, S. Dimopoulos, G. Dvali) для пояснення ієархії фундаментальних взаємодій. Через включення в неї додаткових просторових вимірів, розвиток моделі в роботах J. Stoker із співавторами привів до передбачення мікроскопічних чорних дір в ядро-ядерних зіткненнях на LHC. Втім застосування концепції ADD породило чимало запитань, і мотивувало розвинення інших підходів. На мій погляд, цей напрямок є перспективним для пошуків «нової фізики» на колайдерах, і автор дисертації своєчасно звернувся до задачі про прояви додаткових вимірів.

З іншого боку, передбачення квантової теорії поля у викривленому просторі-часі знаходять підтвердження в астрофізиці і космології. Хоча існує рецепт для узагальнення польових моделей на випадок складної геометрії простору і розвинуто чимало моделей нейтронних і кваркових зірок, Х-бозонів у ранньому Всесвіті, пошук нових проявів особливостей простору-часу в ядерних взаємодіях залишається непростою задачею. Послідовним виглядає шлях узагальнення перевірених моделей, зокрема, моделі ядерної матерії і ядерного фазового переходу рідина-газ, яка розглядається в дисертації.

Поглиблene вивчення систем, окреслених вище, природно породжує низку супутніх задач, а саме про топологічні і геометричні властивості додаткових вимірів, можливість композитної структури частинок темної матерії, а також про статистичні властивості гравітаційних систем частинок з відштовхувальною взаємодією, наприклад, електромагнітною. Їх розгляд сприяє створенню нових математичних підходів в рамках топологічної теорії поля (гравітації), деформованих алгебр і статистики.

Всі ці питання досліджуються в дисертації Назаренка А.В. Підсумовуючи, можна стверджувати, що тема дисертаційної роботи Назаренка А.В. “Статистичні властивості систем із сильною взаємодією та ефекти гравітації” є важливою і актуальною з точки зору теоретичної фізики.

Дисертація складається з анотації (українською і англійською мовами), списку публікацій здобувача за темою дисертації, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел (393 найменування) і викладена на 336 сторінках.

У вступі дисертації обґрунтовано вибір теми досліджень, викладено мету і завдання дослідження, описано наукову новизну отриманих у дисертації результатів та їх практичне значення, вказано особистий внесок здобувача та подано перелік наукових конференцій, на яких доповідалися результати дисертації.

У першому розділі дисертації побудовано моделі систем адронів (нуклонів і піонів) і описано їх термодинамічні стани за відносно низьких температур і густин, які реалізуються, зокрема, у зіткненнях важких іонів. Показано існування рідкої та газоподібної фаз, наявність фазових переходів типу рідина-газ. В наближенні Бардіна-Купера-Шріфера описано енергетичний спектр надплинної нейтронної матерії з прямою взаємодією.

У другому розділі розглядаються процеси і ефекти на певних стадіях зіткнень релятивістських важких іонів, в яких проявляється кваркова структура адронів. На дотермічній стадії зіткнення іонів описана еволюція поперечних потоків партонів та їх вплив на спостережувані дані. На стадії рівноважної кварк-глюонної речовини, запропоновано механізм і оцінено ймовірність прояву додаткових вимірів. Okрім того, у підрозділі 2.3 розглянуто газ фотонів з планківським обмеженням енергії, в якому запропоновано модель додавання 4-імпульсів і отримано термодинамічні функції газу фотонів за планківських температур.

У третьому розділі розглядаються компактні двовимірні простори роду один і два, пов'язані з підпростором додаткових вимірів, описана часова еволюція їх геометрії. Отримано квантові спектри геометричних характеристик, а саме просторового і часового інтервалів, площин. Розглянуто аспекти симетризації польових величин на рімановій поверхні роду два в статистичному описі спектру довжин двовимірних графів, породжених групою симетрій поверхні.

У четвертому розділі вивчаються статистичні властивості систем електрично-заряджених частинок з гравітаційною взаємодією. На основі знайдених розв'язків рівнянь класичної теорії поля, в першому наближенні за константами взаємодії, обчислено термодинамічні функції, що описують ефект екранивания. На основі точного розв'язку рівнянь Ейнштейна-Максвела для екстремальних чорних дір, тобто таких які задовільняють умові рівності констант гравітаційної і електромагнітної взаємодії ($e^2 = G m^2$), обчислено величину гравітаційної затримки часу із застосуванням різних статистик (Бозе-Ейнштейна, інфінітної, Фермі-Дірака, класичної).

У п'ятому розділі досліджуються властивості моделей бозеконденсатної темної матерії з дво- і тричастинковою відштовхувальними взаємодіями на основі рівняння Гроса-Пітаєвського. У випадку темної матерії з гравітаційною і парною взаємодіями обчислено термодинамічні функції і функцію розподілу, а ефект суцільного обертання пов'язано з ідеєю

про композитність частинок темної матерії. У випадку темної матерії галактичного ядра, модель з тричастинковою взаємодією замінює модель з парною взаємодією. Показано, що вона описує існування рідкої і газоподібної термодинамічних фаз.

Основними результатами дисертації, на мій погляд, є такі:

1. В рамках моделі релятивістських нуклонів з прямою взаємодією відтворені властивості ядерної матерії, критичні параметри фазового переходу рідина-газ, а також енергетичний спектр надплінної нейтронної матерії в наближенні Бардіна-Купера-Шріффера.
2. Для симетричної ядерної матерії, що знаходиться у конформно-плоскому просторі-часі (за малих відхилень від метрики Мінковського) досліджено параметри фазового переходу рідина-газ.
3. Для ранньої стадії ядро-ядерних зіткнень при високих енергіях обчислено величину поперечних потоків партонів і описано механізм ізотропізації. Показано, що наявність потоків впливає на основні інтерферометричні величини.
4. Оцінено ймовірність прояву додаткових компактних вимірів на стадії рівноважної кварк-глюонної речовини в зіткненнях ядер. Показано, що їх число не перевищує шість за умов конфайнменту, та їх наявність впливає на охолодження матерії при домінуванні випромінювання.
5. Обчислено термодинамічні функції для випромінювання (фотонів) абсолютно чорного тіла в рамках подвійної спеціальної теорії відносності із запропонованим обмеженням на енергію фотонів. Як результат, густина енергії випромінювання за планківських температур описується законом, який суттєво відрізняється від відомого закону Стефана–Больцмана.
6. Отримано різні значення середньої затримки часу в ансамблі екстремальних чорних дір у статистиках Бозе–Ейнштейна, Фермі–Дірака та інфінітній.
7. Для рівняння Гроса–Пітаєвського з гравітаційною і тричастинковою взаємодіями обчислені термодинамічні функції і виявлено існування фазового переходу першого роду рідина-газ. Для темної матерії галактичного ядра зроблено оцінки фізичних величин.

Основні результати дисертації Назаренка А.В. є новими, оригінальними і обґрунтованими; вони опубліковані в 24 наукових працях у наукових фахових виданнях, серед яких 13 статей – без співавторів, а 10 статей – в журналах, що мають квартілі Q1 і Q2. Результати апробовані на різних конференціях.

Дисертація написана ясно мовою, акуратно, кожний розділ містить вступ і висновки, список літератури включає посилання на роботи інших

авторів. Всі результати, що винесені на захист, одержані автором особисто. Автореферат правильно і повно відображає зміст дисертації.

До дискусійних питань, зауважень та недоліків у дисертації Назаренка А.В. можна віднести наступні:

1. Було би доцільно на окремій сторінці на початку дисертації дати визначення усіх абревіатур, які використовуються у тексті. Це облегшило б читання роботи.
2. При розгляді системи пі-мезонів у розділі 1.3, було б логічно вибирати взаємодію, яка випливає з добре досліджених кіральних $SU(2) \times SU(2)$ (або $SU(3) \times SU(3)$) лагранжіанів. В дисертації враховано члени взаємодії 4-го та 6-го порядку за піонними полями, π^4 і π^6 , з вільними параметрами A і B, але у кіральних моделях, окрім подібних членів пропорційних квадрату маси піона, є також доданки з похідними від полів. Більш того, константи зв'язку в кіральних моделях зафіковані через константу розпаду піона F_π і масу m_π . Такий підхід відповідає експериментальним даним з піон-піонного розсіювання та сучасним уявленням. Використання в дисертації спрощеної піон-піонної взаємодії, можливо, пояснює нереалістично мале значення знайденого параметра $g \sim 8$ MeV, порівняно з кіральними підходами. Ефекти середовища, які впливають на цю константу, навряд чи можуть пояснити таке розходження. Втім, це зауваження скоріше має характер побажання.
3. У розділі 4.2 при конструюванні взаємодії частинок з електромагнітною (ЕМ) і гравітаційною взаємодіями, важливо було б продемонструвати строгим чином еквівалентність двох розглянутих калібривок ЕМ взаємодії – кулонівської та лоренцевської.
4. У розділі 4.3, при розгляді екстремальних чорних дір, цікаво було б розширити підхід на випадок чорних дір, які мають ненульовий кутовий момент (спін). Це є скоріше побажанням на майбутнє.
5. У формулі (2.146) на стор.132, на мій погляд, є неточність. З правої сторони цієї формули повинен бути додатковий множник $L/2\pi$, де L – розмір системи (для одновимірного випадку).
6. На Рис. 2.6 (стор.116) практично неможливо відрізнати криві, що відповідають різним компонентам поля.
7. У розділі 2.2.2 стверджується, що у випадку зв'язаної матерії число додаткових вимірів не перевищує 6, подібно до теорії суперструн. Тут бажано було б надати посилання на відповідні роботи по суперструнам.

Висловлені зауваження не впливають суттєвим чином на загальну велими позитивну оцінку дисертаційної роботи Назаренка А.В. “Статистичні

властивості систем із сильною взаємодією та ефекти гравітації", яка є завершеним науковим дослідженням.

Дисертаційна робота Назаренка А.В. виконана на високому науковому рівні, стосується актуальних проблем теоретичної фізики. Дисертант продемонстрував досконале володіння методами теоретичної і математичної фізики, широку ерудицію та глибоке знання сучасних напрямів теоретичної фізики. Здобуті в дисертації результати можуть бути використані в різних областях фізики, таких як ядерна фізика, астрофізика, квантова теорія гравітації, статистичні методи у системах багатьох взаємодіючих частинок, тощо.

Я вважаю, що дисертаційна робота Назаренка А.В. "Статистичні властивості систем із сильною взаємодією та ефекти гравітації" задовільняє всім вимогам "Порядку присудження наукових ступенів", затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24 липня 2013 року (із змінами, внесеними згідно з Постановами Кабінету Міністрів України № 656 від 19 серпня 2015 року і № 1159 від 30 грудня 2015 року) щодо дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня доктора наук, а її автор, Назаренко Андрій Володимирович, заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

Офіційний опонент:

Завідувач відділу «Квантово-електродинамічних явищ
і електродинаміки адронів»

Інституту теоретичної фізики імені О.І. Ахіезера
ННЦ ХФТІ НАН України,
доктор фізико-математичних наук

О.Ю. Корчин

Підпис О.Ю. Корчина завіряю:

Вчений секретар Інституту теоретичної
фізики імені О.І. Ахіезера

А.І. Кірдін



22 " квітня 2021 р.