

## ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

доктора фіз.-мат. наук, старшого наукового співробітника,  
провідного наукового співробітника відділу теорії ядра

Інституту ядерних досліджень НАН України

Магнера Александра Григоровича

на дисертаційну роботу Савчука Олега Володимировича

“РІВНЯННЯ СТАНУ СИЛЬНОВЗАЄМОДІЙНОЇ МАТЕРІЇ ТА  
РЕЛЯТИВІСТСЬКІ ЗІТКНЕННЯ ВАЖКИХ ІОНІВ”

представлену до захисту на здобуття ступеня доктора філософії  
(напрямок 10 - природничі науки, спеціальність 104 - фізика та астрономія)

Квантова хромодинаміка (QCD) чітко визначена математично, але аналітичні результати в умовах, що відповідають звичайним ядрам та нейтронним зіркам, не існують. Експерименти по зіткненню важких іонів створюють сильно взаємодійну матерію у лабораторії, яка описується феноменологічними моделями. Такий опис може бути статистичним, коли досліджуються рівноважні властивості середовища, або динамічним, коли розглядається еволюція системи від початку до кінця зіткнення.

Властивості матерії у динамічних моделях задаються рівняннями стану або потенціалом взаємодії, у гідродинаміці та транспортних моделях відповідно. Граткові результати в умовах нульової густини заряду є важливим обмеженням для феноменологічних рівнянь стану, які потрібно враховувати. До таких даних належать тиск, густина енергії, ентропія, а також похідні від тиску за баріонним хімічним потенціалом. Ці похідні пропорційні кумулянтам розподілу баріонного заряду.

У реальних експериментах заряди у всіх системах не змінюються через закони збереження. Існує певна неузгодженість між обчисленнями у феноменологічних моделях у великому канонічному ансамблі та реальними зіткненнями у мікροканонічному ансамблі. Важливо враховувати ефекти глобального і локального збереження заряду, а також нерівноважні процеси на ранніх та кінцевих стадіях релятивістського зіткнення, щоб точно і ефективно спостерігати вплив рівняння стану або потенціалу взаємодії. Аналізу особливостей застосування граткових обчислень та моделюванню експериментів по зіткненню важких іонів з врахуванням всіх цих особливостей і присвячена дисертаційна робота.

Дисертаційна робота, яка представляється до захисту вперше, має таку структуру: Вступ, мотивації, три розділи, висновки та додатки.

У вступі демонструється релевантність досліджень, показується інтеграція роботи у наукові плани та теми, пояснюється постановка задачі і мета дослідження, а також обґрунтовується корисність отриманих результатів для подальших досліджень. Зазначається особистий внесок здобувача та проведена апробація результатів.

У другому розділі після мотивації розглядається вплив особливостей термодинамічного потенціалу на радіус збіжності розкладу ряду Тейлора по хімічному потенціалу відповідно до теорії Лі-Янга. Попередні дослідження показали, що ґраткові дані передбачають радіус збіжності приблизно 2-3 рази більшого, ніж хімічний потенціал поділений на температуру. У той же час моделі, які не враховують критичну точку, але містять відштовхувальні взаємодії чи фермі статистику, передбачають радіус збіжності значно більшим. Тому розглянуто моделі ван дер Ваальса, Скирма та Валечки, які містять критичну точку ядерної матерії, добре відому з властивостей скінченних ядер та їх зіткнень при низьких енергіях. У цьому випадку радіус збіжності стає набагато меншим і узгоджується з ґратковими результатами. Крім того, досліджено збіжність ряду Тейлора і ефективність оцінки радіусу збіжності з використанням скінченної кількості коефіцієнтів. Виявлено, що для оцінки радіусу збіжності з точністю приблизно 10% достатньо десять членів.

Третій розділ досліджує ефект фазового переходу у густій ядерній матерії. Одним зі спостережуваних явищ, які планується використовувати у реальних експериментах, є множинність та спектр дилептонів. Дилептони, які не взаємодіють з матерією, утворюються протягом усього зіткнення і чутливі до ранніх стадій реакції.

Поза 1.5 нормальної ядерної густини потенціал взаємодії є невідомим і може містити фазовий перехід. У дисертації розглянуто гіпотетичні потенціали, що призводять до фазового переходу. Це призводить до зміни траєкторії системи у площині температури і баріонної густини, що впливає на спектральні властивості середовища та модифікує форму та нормування спектру дилептонів. Множинність заряджених пі-мезонів зростає на 40%, що пояснюється довшим часом життя системи.

Четвертий розділ відповідає на питання спостережень флуктуацій зарядів, що зберігаються у експериментах зі зіткнення важких іонів. Модель Біноміальної Реєстрації застосовано до флуктуацій окремого типу частинок, а також до флуктуацій зарядів, що зберігаються. Ця модель відповідає відсутності кореляцій між частинками у імпульсному просторі, оскільки у класичній рівноважній статистичній механіці всі кореляції відсутні. Очікується, що квантові ефекти є незначними, а нерівноважні процеси, такі як колективний рух, можуть бути джерелом кореляцій у експериментах при високих енергіях пучка.

Біноміальне припущення використовується для опису експериментальних результатів колаборації HADES, де функціональна залежність між флуктуацій від вікна по ширині кількісно та якісно відповідає передбаченням біноміальної моделі. Це цікавий результат, який підтверджує відсутність кореляцій у імпульсному просторі.

Перетворення флуктуацій густини заряду на флуктуації в імпульсному просторі досліджено у наступній частині дисертації четвертого розділу. Там використовуючи модель під-ансамблів побудовано флуктуації баріонного заряду під час фріз-ауту. Новим у цій роботі є врахування адронної фази. Виявляється, що погано вивчена реакція баріон-антибаріонної анігіляції є важливою і сильно впливає на спостережувану картину. Конкуруючим ефектом у цьому випадку виступає локальне збереження заряду. Запропоновано спосіб розділити ці два ефекти та краще вивчити адронні реакції.

Локальному збереженню заряду присвячено велику частину розділу. Розглядається лінійний відгук гідродинамічного середовища на рівноважні локальні флуктуації зарядів, що зберігаються. Балансуючі кореляції цих зарядів обчислена за допомогою функцій Гріна. Отримані кореляційні функції представлені на рисунках. Цікавим у цьому випадку є те, що при скінченній фоновій густині заряду виникає конвекційна складова, яка призводить до далекодійних кореляцій у баріонних, електричному та дивному зарядах. Загалом оскільки матриця сприйнятливостей передає якісно поведінку швидкості звуку, балансує кореляція може бути корисною для визначення жорсткості рівняння стану.

Серед найбільш важливих результатів слід відзначити наступне:

1. Використання моделі, що містить критичну точку у ядерній матерії, для отримання радіусу збіжності ряду Тейлора. Досліджено якість оцінки радіусу збіжності з використанням різних методів, включаючи більш складні підходи, такі як врахування сингулярності поза дійсною осею.
2. Досліджено динаміку фазового переходу у щільній ядерній матерії та його вплив на множиність та спектри дилептонів.
3. Застосування моделі некорельованого розподілу частинок до даних колаборації NADES.
4. Вивчено вплив адронної фази та локального збереження заряду після фріз-ауту на флуктуації протонного числа.
5. Проведено аналітичні дослідження локального збереження заряду в умовах скінченої густини баріонного заряду, а також кореляцій поперечного імпульсу з поперечним імпульсом (так званий "горб") у експерименті ALICE.

Результати є важливими, а їх кількість достатня. Робота має чітку структуру і представляє закінчене наукове дослідження. Однак є зауваження:

1. Цікаво було б дослідити ефекти квантової статистики на радіус збіжності ряду Тейлора для тиску по хімпотенціалу при низьких енергіях збудження у великому статистичному ансамблі. Відомо, що кумулянти другого та більш високих порядків можуть сильно змінюватися.
2. На стор. 72 стверджується, що “фазовий перехід, який закінчується гіпотетичною КТ, повинен викликати великі флуктуації зарядів”, але це не виглядає досить обгрунтовано. Середнє значення заряду визначено з точністю до її середньо квадратичної флуктуації. І тому останні повинні бути відносно малими. Питання тільки по відношенню до середнього значення (далеко від КТ ) або її квадрату біля КТ. Якщо це не так, як це має місце в теорії флуктуацій Ландау біля КТ, то треба покращувати там саму теорію флуктуацій, враховуючи скінченність системи, більш реалістичну міжчастинкову взаємодію, нелінійний відгук тиску та кореляції понад теорією середнього поля.

3. Як спостерігати флуктуації баріонних зарядів при низьких енергіях зіткнень коли колективні потоки майже відсутні, особливо важко біля КТ? Як врахувати квантово-статистичні поправки?

Також слід вставити обговорення цікавого рисунка 3.2, виправити граматичні та стилістичні помилки, які містяться у тексті та на рисунку 4.2а. Всі ці зауваження, однак, не стосуються достовірності результатів і не зменшують їх важливість.

Представлена до захисту робота виконана на високому теоретичному рівні. Достовірність і обґрунтованість досліджень визначається використанням надійних математичних методів та методів обчислень, і порівнянням отриманих теоретичних результатів з експериментальними даними. Результати, наведені в дисертації, опубліковані в статтях у провідних реферованих наукових журналах, що входять до наукометричної бази SCOPUS. Наукові результати та їх апробація на наукових конференціях повністю відповідають умовам п.8 "Порядку присудження ступеня доктора філософії", затвердженого Постановою № 44 Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р.

Вважаю, що дисертація Савчука Олега Володимировича "Рівняння стану сильновзаємодійної матерії та релятивістські зіткнення важких іонів" повністю відповідає спеціальності "104 Фізика та астрономія" та вимогам "Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціальної вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії", затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року №44. Порухів академічної доброчесності в дисертації та в наукових працях, у яких було представлено результати дисертації, мною не виявлено. Надана робота безумовно заслуговує на позитивну оцінку, а її автор, Савчук Олег Володимирович, заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю "104 Фізика та астрономія".

Доктор фіз-мат. наук,  
старший науковий співробітник  
2024 року

О.Г. Магнер