

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА
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)

Зіткнення важких іонів є важливим методом дослідження сильновзаємодійної матерії у лабораторних умовах. Для нульової густини баріонного заряду, матерію можна вивчати за допомогою ґраткової хромодинаміки. Під час таких досліджень можна обчислити коефіцієнти розкладу тиску сильновзаємодійної матерії в ряд Тейлора за баріонним хімічним потенціалом. Однак для отримання рівняння стану у контексті ґраткової хромодинаміки не існує надійного методу за межами радіуса збіжності ряду Тейлора. У таких ситуаціях зазвичай використовують ефективні теорії поля. Одним з основних викликів є вибір правильної теорії, яка враховує всю феноменологію сильновзаємодійної матерії. Для якісної і кількісної оцінки моделей користуються експериментальними даними. Кожне експериментальне спостереження має свої особливості і вимагає правильної інтерпретації. Більшість зіткнень при високих енергіях можна успішно описати за допомогою гідродинамічної моделі, де ключовими є визначення початкових умов і рівнянь стану. При низьких енергіях застосовуються транспортні підходи, такі як квантова молекулярна динаміка чи рівняння Больцмана з квантовою статистикою, наприклад, модель Больцмана-Уелінга-Уленбека. Дисертаційна робота Олега Володимировича Савчука присвячена застосуванню гідродинамічних, транспортних та статистичних моделей для опису експериментальних даних.

Дисертаційна робота, яка планується до захисту, представлена вперше і має структуру, що складається з Вступу, трьох розділів та апендиксу.

У Вступі обґрунтована актуальність основних напрямків досліджень, показаний зв'язок роботи з науковими планами та темами, сформульовано мету та задачі дослідження, продемонстровано, в чому полягає новизна та практичне значення отриманих результатів, висвітлено особистий внесок здобувача при отриманні результатів та вказано, де були апробовані результати дисертаційної роботи.

У першому розділі дисертації розглядаються питання збіжності ряду Тейлора по баріонному хімічному потенціалу у околі нуля. При цьому збіжність ряду може бути обмежена особливістю термодинамічного потенціалу, що відповідає критичній точці деконфайнменту. Проте, це може бути також обумовлено статистикою Фермі, виключеним об'ємом чи іншою критичною точкою. Вплив ядерної критичної точки детально досліджено у дисертації з використанням феноменологічних рівнянь стану. Розглянуто рівняння стану ван дер Ваальса, модель Валечки, потенціал Скірма. У всіх випадках якісна поведінка радіусу збіжності однакова, а кількісні відмінності є досить малими. При цьому радіус збіжності у діапазоні температур, що відповідає кросоверу, складає 2-3 хімічного потенціалу, поділеного на температуру, що відповідає ґратковим оцінкам.

У другому розділі дослідження проведено аналіз впливу фазового переходу у густій ядерній матерії на народження дилептонів. Для цього був побудований потенціал взаємодії, який враховує фазовий перехід. З використанням цього потенціалу були проведені транспортні симуляції, які були локально термодинамічно усереднені для отримання просторово-часового розподілу густини та температури у системі.

Було виявлено, що множинність народження дилептонів зростає при наближенні до кривої фазового переходу. Цей ефект пояснюється тим, що дилептони не взаємодіють з оточуючим середовищем та швидко його покидають. Таким чином, в одиницю часу в середовищі утворюється потік дилептонів. Внаслідок наявності фазового переходу зростає час життя системи сильновзаємодійної матерії, що утворюється при зіткненні важких іонів.

Було показано, що час життя системи сильновзаємодійної матерії впливає на множинність народжених дилептонів, але не впливає на множинність народжених адронів.

У третьому розділі розглянуто флуктуації в експериментах зі зіткнення важких іонів. Зокрема, була досліджена модель біноміальної реєстрації частинок, і проведено її докладний аналіз за допомогою транспортної моделі, в якій симулювалися протон-протонні зіткнення. Були отримані формули, які пов'язують флуктуації загальної кількості частинок певного типу з їх флуктуаціями у певній підсистемі.

Також був розглянутий випадок, коли внаслідок колективного руху флуктуації в просторі координат переходять у флуктуації в імпульсному

просторі, і були отримані оцінки мір флуктуацій для експериментів ALICE та STAR.

Крім того, у цьому розділі були розглянуті ефекти баріонних анігіляцій на нормовану варіацію загальної кількості протонів та локальне збереження заряду. Локальну кореляцію, викликану збереженням заряду, було обчислено за допомогою гідродинамічних функцій Гріна. Показано ефекти в'язкості, рівняння стану, дифузії та конвекції при скінченній густині баріонного заряду у моделі Бйоркена.

Серед найбільш важливих результатів слід відзначити наступне:

1. Було встановлено, що радіус збіжності ряду Тейлора для тиску сильновзаємодійної матерії може бути обмежений критичною точкою у ядерній матерії. Досліджено особливості поведінки такого ряду.
2. Проведено розрахунки множинності та спектрів дилептонів у щільній ядерній матерії. Показано, що фазовий перехід призводить до збільшення часу життя системи та збільшення кількості утворених дилептонів.
3. Вивчено модель біноміальної реєстрації частинок. Проаналізовано умови її застосовності в реальних експериментах та транспортних симуляціях. Надано інтерпретацію отриманим флуктуаціям спільно з колаборацією HADES.
4. Побудовано варіацію протонного числа порівняно зі сумарним числом протонів та антипротонів у сценаріях, які враховують або не враховують анігіляцію баріонів та у випадку локального збереження заряду.
5. Досліджено ефекти локального збереження на флуктуації зарядів, що зберігаються.

Оцінка якості та обсягу проведених досліджень не викликає сумнівів. Однак, на мою думку, третій розділ перевантажений формулами, і в тексті є друкарські помилки. Також є наступні зауваження:

1. У першому розділі можна було б доповнити розгляд задачі врахуванням впливу скінченного розміру системи на значення радіусу збіжності розкладу тиску в ряд Тейлора.
2. У першому розділі дисертаційної роботи використовується спрощена модель, що включає ядерну критичну точку, але не включає критичну

точку деконфайнменту. Цікаво було б також дослідити поведінку радіусу збіжності у моделі, що включає обидві зазначені критичні точки.

3. У другому розділі рівняння руху транспортної моделі використані в нерелятивістському наближенні, вони не є коваріантними та не задовольняють принципу причинності. Було б цікаво дізнатися як зміниться результат задачі, якщо використати транспортну модель, що заснована на повністю коваріантних рівняннях руху.
4. У третьому розділі розглядається рівняння стану, яке є рівноважним по всім компонентам. Однак у симуляціях іонних зіткнень часто використовують початкові умови так званого «кольорового скляного конденсату», у якому присутні лише глюонні поля, а кварки відсутні. Цікаво дізнатися, чи можна сподіватися побачити ефекти народження кварків в даній моделі.

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 знань 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, доцент кафедри
квантової теорії поля та космофізики
фізичного факультету
Київського Національного Університету
імені Тараса Шевченка
Горкавенко Володимир Миколайович

