

РЕЦЕНЗІЯ
на дисертаційну роботу Савчука Олега Володимировича
«Рівняння стану сильновзаємодійної матерії та релятивістські зіткнення
важких іонів», представлену на здобуття ступеня доктора філософії
з галузі знань 10 «Природничі науки»
за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія»

Сучасна картина сильновзаємодіючої матерії вимагає узгодження спостережуваного адронного сектору із теоретично передбаченим кварк-глюонним сектором, який описується квантовою хромодинамікою (КХД). Через складність пояснення процесів в адронному секторі з точки зору кваркової будови адронів, а також через безліч даних про явища за участю лише адронів, актуальним є застосування феноменологічних адронних моделей. Деякі з них вивчаються і використовуються в дисертації як для опису спостережуваних, так і у спробах знайти спільні точки з КХД за умов релятивістських зіткнень важких йонів, зокрема на прискорювачах RHIC і LHC.

Зосередженість задач дисертації на системах багатьох частинок зумовлює використання методів статистичної фізики і гідродинаміки, а також комп'ютерного моделювання для опису еволюції матерії на різних етапах зіткнень важких йонів. Тим самим, з боку теорії залучаються, зокрема, модельні рівняння стану сильновзаємодіючої матерії і коефіцієнти переносу, а для відтворення спостережуваних даних – сучасні комп'ютерні симулятори. Також зауважимо спроможність часто використовуваних в дисертації рівнянь стану описувати фазовий перехід першого роду “рідина-газ” в ядерній матерії, що розширює коло розглядуваних фізичних явищ.

Дисертація (176 сторінок, 28 рисунків) розпочинається зі вступної частини, складається з п'яти основних розділів і завершується *Висновками та Літературою* (з 236 найменувань, серед яких – 21 публікація автора: 12 – за матеріалами дисертації із 5 повторами, і 4 роботи, які не включено до дисертації). Наприкінці містить *Глосарій, Подяки і Додаток*.

У *вступній частині* дисертації надається загальна характеристика дисертаційної роботи згідно з атестаційними вимогами.

У *першому розділі* окреслено передумови, сучасний стан досліджень та проблематику. Однак, враховуючи специфіку задач, підрозділи дисертації або мають власний вступ або супроводжуються відомостями із зазначеної галузі.

У *другому розділі* вивчаються моделі з класичним і модифікованим (квантовою статистикою) рівняннями стану ван-дер-Ваальса, а також модель Валéчки, задіяні для опису фазового переходу рідина-газ в ядерній матерії, у випадку комплексного хімічного потенціалу μ_B баріонів. За різних температур T , за теорією Лі–Янга, визначаються точки розгалуження великого термодинамічного потенціалу адронів у комплексній площині μ_B . Показано, що ці

точки відповідають: критичній точці $T = T_c \sim 20$ MeV, спінодалям фазового переходу для $T < T_c$, та сингулярностям, подібним до кросовера, при $T > T_c$. Цей результат, спершу отриманий аналітично для класичного рівняння ван-дер-Ваальса, виявився загальним для довільної моделі середнього поля, що впливає з універсальності критичної поведінки. А відмінності у положенні точок розгалуження для різних моделей проявляються при $T \lesssim 100$ MeV.

Надалі, для газу адронних резонансів з ван-дер-ваальсівськими рівняннями стану досліджується радіус r збіжності ряду Тейлора функції тиску за параметром μ_B/T . Знайдено $r \sim 2 \div 3$ для температур $T \sim 140 \div 170$ MeV, що підтверджує зв'язок (через параметри) моделі радше з фазовим переходом рідина-газ, ніж із кіральним фазовим переходом, очікуваним в КХД. Тому, при $T \sim 130 \div 180$ MeV слід враховувати внутрішні ступені вільності адронів.

Третій розділ присвячений випромінюванню ділептонів у зіткненнях йонів із застосуванням мікроскопічної моделі переносу UrQMDv3.5 з локальним термодинамічним усередненням. Для вивчення впливу фазових переходів на вихід ділептонів за енергій на FAIR розглядаються три версії дійсного ефективного потенціалу баріонів як функції (локальної) густини: один – стандартний, з одним мінімумом, і два – з варіативним додатковим мінімумом за більшої густини. Без розгляду ранньої і пізньої стадій зіткнення симулюється вихід ділептонів, які несуть інформацію з гарячої та густої фази, тобто про канали з ρ , ω та ϕ мезонами в середовищі. Виявляється, що фазові переходи (через збільшення часу життя системи) зумовлюють зростання частки числа ділептонів до числа заряджених піонів за відносно низьких інваріантної маси M пари і енергії пучка. Цікаво, що при $M \approx 50$ MeV очікується посилення виробництва ділептонів в 2-3 рази, а по інтегрованому діапазону – в 1.5 рази. Із ростом енергії пучка також прогнозується зниження температури ділептонів (на ~ 5 MeV) у діапазоні низьких мас.

Четвертий розділ складається з чотирьох підрозділів (задач), присвячених дослідженню флуктуацій збережуваних зарядів та їх кореляцій.

У підрозділі 4.1 метод біноміальної реєстрації дозволяє отримати аналітичні вирази для мір флуктуацій числа частинок або заряду у підсистемі (в просторі імпульсів), а також парну кореляційну функцію для двох типів частинок/зарядів. Показується, що оцінити флуктуації числа баріонів можна на основі даних про протони; а особливості методу проявляються у моделювання зіткнень в UrQMD. Отримані формули вжито для опису даних HADES для Au-Au зіткнень з енергією $\sqrt{s_{NN}} = 2.42$ GeV: відтворено поведінку кумулянтів, залежних від вікна по рапідності, за відсутності імпульсних кореляцій між утвореними протонами.

У підрозділі 4.2, на основі буст-інваріантної моделі без поперечних потоків обчислено кореляційну матрицю для семи збережуваних зарядів: енергії, 3-імпульсу, баріонного числа, електричного заряду і дивності. Кореляції виникають упродовж еволюції системи згідно з в'язкою гідродинамікою і

дифузією, та подаються як функції відносної просторової швидкості $\Delta\eta$ і різниці рапідностей Δy . Такий підхід застосовано для трьох рівнянь стану: жорсткого, м'якого та ідеального газу резонансів. Проведено ретельний аналіз кореляцій і обчисленої швидкості звуку.

У підрозділі 4.3, із застосуванням методу підансамблів, аналізуються флуктуації числа протонів на LHC і реалістичність локального збереження заряду. Тут, в рамках UrQMD частинки еволюціонують в адронній фазі з гіперповерхні виморожування, і оцінюється вплив різних стадій розвитку системи на флуктуації. Встановлено, що локальне збереження заряду, як з анігіляціями, так і без них, пояснює дані колаборації ALICE на LHC. Для розрізнення цих двох сценаріїв пропонується показник масштабованої дисперсії флуктуації сумарного числа протонів та антипротонів.

Підрозділ 4.4 присвячений врахуванню кореляцій поперечних імпульсів частинок, зокрема для пояснення даних ALICE на LHC для Pb-Pb зіткнень з $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV. З необхідності опису балансуєної кореляції вимагає рівняння дифузії-конвекції, а для формулювання початкових умов задіяної гідродинамічної еволюції виникає потреба у колективних поперечних потоках, які розвиваються на ранніх етапах зіткнення. Показано, що шукана для опису даних кореляція складається з трьох внесків: дорівноважного, гідродинамічного (зумовленого функцією джерела) і ефектів розпаду частинок.

Результати і висновки дисертації є достатньо обґрунтованими. Це впливає з аналітичних, а також різнобічних чисельних оцінок, поданих на графіках. Формулюючи основні результати і висновки, автор долучає фізичне тлумачення виявлених закономірностей.

Достовірність результатів дисертації забезпечена застосуванням загально-визнаних означень шуканих величин у фізиці ядро-ядерних зіткнень, статистичній фізиці і термодинаміці, підтвердженням правильності отриманих залежностей за допомогою порівняння і зв'язку з результатами інших авторів. Представлені результати є достатньо переконливими, науково обґрунтованими, а їхній аналіз проведено з урахуванням останніх даних фахової літератури. Додатковим свідченням обґрунтованості і достовірності результатів слугують рецензовані публікації дисертанта та їх представлення на наукових конференціях.

У дисертації новими результатами вважаю такі:

1. Показана подібність термодинамічних особливостей адронних моделей, які описують фазовий перехід рідина-газ в ядерній матерії і належать до класу універсальності моделі ван-дер-Ваальса. Обчислено радіус збіжності ряду Тейлора функції тиску за хімічним потенціалом баріонів.

2. Виявлено посилення виходу ділептонів (та їх спектр) у зіткненнях йонів за наявності додаткового фазового переходу за густини, рівною двом-трьом нормальним густинам ядерної матерії.
3. Отримано зв'язок флуктуацій у підсистемі адронів з флуктуаціями у всьому імпульсному просторі. Знайдено старші моменти випадкових величин.
4. Окреслено умови локального збереження (баріонного) заряду та оцінено величину відповідної кореляції за умов експерименту ALICE на LHC.
5. Встановлено вплив протон-антипротонних анігіляцій в адронній фазі на варіацію протонного числа.

Основні результати дисертаційної роботи викладено в 12 публікаціях. Серед них 9 – в наукових журналах, які індексуються в базах даних Scopus та Web of Science, а 3 – у вигляді електронних препринтів в arXiv.org. Вісім статей опубліковано у виданнях, що належать до першого квартиля (Q1), одна стаття – у виданні третього квартиля (Q3). Апробацію отриманих результатів засвідчують доповіді на 9 наукових конференціях.

Результати дисертаційного дослідження мають теоретичний характер. Вони розширюють відомості про фізичні, зокрема статистичні і термодинамічні, властивості адронної матерії в релятивістських зіткненнях важких йонів, а також можуть бути використані для подальших теоретичних і експериментальних досліджень.

До дисертації є такі зауваження:

1. Читання дисертації ускладнене через неякісний переклад англomовних статей автора на українську мову.
2. У розділі 2, при розгляді адронних моделей і фазового переходу рідина-газ в ядерній матерії недоречно асоціювати їх з КХД через нехтування кварковими і глюонними ступенями вільності. Там же дивує пошук за високих температур узгодженості з КХД моделі ван-дер-Ваальса, в якій не закладено жодних структурних перетворень частинок окрім низько-енергетичного фазового переходу рідина-газ.
3. У підрозділі 4.4, доходячи висновку про вже відому необхідність врахування поперечних колективних потоків із ранніх стадій зіткнення при описі даних RHIC та LHC, дисертант ігнорує посилання на результати групи Ю.М. Синюкова в ІТФ ім. М.М. Боголюбова.
4. Як побажання, з метою розширення можливостей підходу у розділі 4 варто було б додати обертовий момент системи до динамічних зарядів.

Проте висловлені зауваження не впливають на мою позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Підсумовуючи, дисертація Савчука О.В. на тему «Рівняння стану сильно-взаємодійної матерії та релятивістські зіткнення важких іонів», подана на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія» є завершеним науковим дослідженням, результати якого мають науково-практичне значення і можуть бути використані для вивчення статистичних і термодинамічних властивостей матерії в ядро-ядерних зіткненнях. У роботі та наукових публікаціях немає порушень академічної доброчесності. Вважаю, що за актуальністю, новизною, практичним значенням та обсягом результатів дисертаційна робота відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» (з наступними змінами) та «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 44 від 12 січня 2022 року, а її автор, Савчук Олег Володимирович, заслуговує на присудження ступеня доктора філософії у галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія».

Рецензент:

Провідний науковий співробітник
Інституту теоретичної фізики
ім. М. М. Боголюбова НАН України
доктор фізико-математичних наук

Андрій НАЗАРЕНКО