

## РЕЦЕНЗІЯ

### 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)

В дисертаційній роботі Савчука Олега Володимировича розглядається низка актуальних задач фізики зіткнень важких іонів та феноменології сильновзаємодійної матерії. Об'єднуювальним фактором є застосування різних експериментальних вимірювань з метою визначити рівняння стану сильновзаємодійної матерії. В ній використано гідродинамічні, транспортні та статистичні моделі. Гідродинамічний підхід вимагає визначення таких транспортних коефіцієнтів як дифузія, зсувна та об'ємна в'язкості. Транспортні моделі можуть розв'язувати рівняння типу Больцмана чи Гамільтонові системи рівнянь. Водночас важливо визначити потенціал середнього поля/взаємодії, який також пов'язаний з рівнянням стану. Статистичні підходи дають змогу обчислити рівняння стану та з його допомогою отримати значення таких величин, як флуктуації зарядів, що зберігаються. Флуктуації є цікавими спостережуваними величинами у контексті пошуку фазового переходу і критичної точки, оскільки вони мають нетривіальну (неаналітичну) поведінку в їх околі.

Дисертація містить вступ, три розділи та додаток.

У **вступі** надано загальну характеристику роботи та обґрунтування актуальності виконаних досліджень. Показано зв'язок роботи з науковими планами та темами. Сформульовано мету досліджень та задачі, які потрібно було розв'язати для її досягнення. Показано, в чому полягає новизна та практичне значення отриманих результатів. Вказано особистий внесок здобувача під час отримання результатів.

В **першому розділі** розглянуто задачі, які є актуальними щодо пошуку критичної точки, використовуючи теорію Лі-Янга до ґраткових обчислень квантової хромодинаміки. З дослідження аналітичних властивостей рівняння стану, отриманого на ґратці, можна оцінити положення сингулярності, що обмежує радіус збіжності ряду Тейлора. Ця сингулярність може бути зумовлена як критичною точкою, так і іншими особливостями: взаємодіями, квантовою статистикою та іншою критичною точкою в ядерній матерії, які також можуть обмежити радіус збіжності.

**Другий розділ** присвячено моделюванню зіткнень важких іонів за допомогою транспортного підходу. Цей підхід є важливим за нижчих енергій зіткнень, коли довжина вільного пробігу стає порівняною з розмірами системи. У транспортну модель введено

модифікацію потенціалу, що відповідає метастабільному стану і спричиняє існування фазового переходу у густій ядерній матерії. Зміна просторово-часового розподілу температури і густини у зіткненнях важких іонів відображається у спектрах дилептонів. Саме їх запропоновано як сигнал гіпотетичного фазового переходу у густій ядерній матерії.

**Третій розділ** описує методи пошуку флуктуацій зарядів, що зберігаються і пов'язані з рівнянням стану в умовах, що відповідають експериментальним. Водночас виникає низка викликів: різниця між (великим) канонічним ансамблем (у якому проводять розрахунки в статистичних моделях) та мікροканонічним (експеримент, транспортні моделі). До того ж важливим є той факт, що у динамічній системі закони збереження не є глобальними, а зумовлені початковими кореляціями між зарядами та релаксаційними процесами у середовищі. Так виникає локальне збереження заряду, яке на гідродинамічних масштабах визначає поведінку кумулянтів зарядів, що зберігаються. Крім того важливим є моделювання процесів у фазі з порушеною хімічною рівновагою (кінцева стадія зіткнення, що супроводжується розпадом резонансів). Прикладом такої реакції є баріон-антибаріонна анігіляція, що має великий переріз розсіювання та сильно модифікує спостережувані дані на великому адронному колайдері.

Серед отриманих результатів треба відмітити такі:

1. Критична точка фазового переходу рідина-газ у ядерній матерії може проявлятися в аналітичних властивостях рівняння стану, обчисленого на ґратці.
2. Модифіковано потенціал взаємодії у густій ядерній матерії метастабільним станом, що спричиняє існування нового фазового переходу. Сліди цього гіпотетичного фазового переходу знайдено у спектрах дилептонів, що народжуються у зіткненнях важких іонів.
3. За допомогою моделі біноміальної реєстрації частинок проаналізовано флуктуації. Дано інтерпретацію результатів колаборації HADES.
4. Показано, що ефект анігіляцій у адронній фазі є важливим в дослідженнях флуктуацій на великому адронному колайдері. Крім цього, треба враховувати ефекти локального збереження заряду.
5. Отримано рівняння гідродинамічного відгуку на стохастичні флуктуації середовища. Використовуючи числові розрахунки функцій Гріна одержано величину та ширину для кореляцій поперечного імпульсу за нульової густини заряду та всіх інших зарядів, що зберігаються за скінченної густини заряду.

Водночас треба зауважити, що виклад дисертації має певні недоліки:

1. Наведені розрахунки містять тільки адронні ступені свободи. Звичайно, в повній КХД присутні й інші механізми, крім переходу ядерної рідини-газу, які впливають на аналітичні властивості термодинамічного потенціалу і які не описуються моделлю  $vdW$ -HRG. Наявність самого переходу ядерної рідини-газу може впливати на властивості збіжності ряду Тейлора. Які обмеження на радіус збіжності ряду Тейлора, крім тих, що пов'язані лише з переходом ядерної рідини-газу, можуть бути додатково оцінені?
2. Також треба зазначити, що перехід рідина-газ у цій роботі описано в наближенні середнього поля, і асоційована критична поведінка відповідає класу універсальності середнього поля. Вихід за межі наближення середнього поля змінить клас універсальності та характер сингулярності, асоційованої з критичною точкою фазового переходу. Чи можливо подібних результатів з вивчення сингулярностей за межами середнього поля досягнути, наприклад, за допомогою методів ренормгрупи?
3. Оцінка випромінювання дилептонів з динамічної системи, яка утворилася в результаті релятивістського зіткнення важких іонів, вимагає детального мікроскопічного опису зазначеної еволюції, яку в дисертації не наведено. Крім того, видається необхідним використовувати принципи нерівноважної термодинаміки, чого також не спостерігається.
4. За малих енергій зіткнень немає чітких критеріїв для розрізнення між спостерігачем та учасником нуклонів. Потрібні додаткові дослідження в цьому напрямі. Крім того, за такої низької енергії зіткнення присутні ядерні фрагменти у кінцевому стані. Існування великої частки баріонів у формі ядерних фрагментів може генерувати великі флуктуації числа вільних протонів. Нарешті, колективні потоки баріонів за низьких енергій зіткнень здаються досить малими, щоб передавати кореляцію частинок від координатного до імпульсного простору. Добре було б мати хоча б оцінки щодо того, коли і як це потрібно враховувати.

Відзначу, що зроблені зауваження жодним чином не стосуються достовірності результатів і не зменшують їх вагомість. Дисертація написана гарною науковою мовою.

Отже, з огляду на вищенаведене, слід вважати, що дана робота виконана на високому теоретичному рівні. Вона є цілісною та завершеною науковою роботою, яка стосується подальшого розвитку використаного методу досліджень та отримання нових результатів у галузі феноменології зіткнень важких іонів. Достовірність та обґрунтованість проведених досліджень визначається використанням сучасних математичних методів та порівняння отриманих результатів з експериментальними даними і результатами інших теоретичних робіт. Результати, наведені в дисертації, опубліковані в 11 статтях у провідних закордонних наукових журналах. Якість та обсяг проведених досліджень, особистий внесок здобувача не викликають сумніву.

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. Порушень академічної доброчесності в дисертації та в наукових працях, у яких було представлено результати дисертації, я не виявив. 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 фізико-математичних наук,  
професор, академік НАН України,  
завідувач відділу Інституту теоретичної  
фізики ім. М.М. Боголюбова  
Національної академії наук України

Богдан ЛЕВ