

**ВІДГУК  
офіційного опонента**

на дисертаційну роботу **Вовченка Володимира Юрійовича**  
**«Еволюція взаємодіючої багаточастинкової системи, що виникає**  
**у зіткненнях релятивістських ядер»,**

подану на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук  
за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика

*Актуальність теми дисертаційної роботи.* Дисертаційна робота В.Ю. Вовченка присвячена теоретичному аналізу різних стадій процесу зіткнення релятивістських ядер. Експерименти із релятивістських ядерних зіткнень є одним із головних напрямків сучасної фізики високих енергій. У цих експериментах, що проводяться на таких прискорювачах як RHIC у Брукхейвені або Великий Адронний Колайдер у ЦЕРНі, вивчаються властивості сильно-взаємодіючої матерії при високих густинах енергії. Інтерпретація експериментальних даних неодмінно ґрунтується на теоретичних моделях опису процесу зіткнення. Теоретичні дослідження різних аспектів процесу зіткнення релятивістських ядер, відповідно, є актуальними і необхідними.

*Загальна характеристика структури та змісту роботи.* Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатку.

У *вступі* стисло вказано на актуальність напрямку досліджень, викладено здобутки дисертанта, відзначено новизну отриманих результатів, а також відокремлено особистий внесок дисертанта у розв'язок поставлених завдань.

У *першому розділі* дисертації автором викладено основні питання та задачі, що вивчаються за допомогою релятивістських ядро-ядерних зіткнень, зокрема описано, як за допомогою експериментів при різних енергіях зіткнення можна вивчати різні ділянки фазової діаграми сильновзаємодіючої матерії. Обговорено основні підходи для опису різних стадій зіткнення ядер із зазначенням їх переваг та недоліків. Розділ

завершується наведенням просторово-часових гіперповерхонь піонного фрізауту, що були розраховані здобувачем в рамках мікроскопічної транспортної моделі UrQMD. Цінність результату полягає у тому, що ці гіперповерхні дають наочну і, у той же час, більш-менш повну просторово-часову картину центральних зіткнень ядер.

У другому розділі дисертант представив аналіз імпульсних розподілів різноманітних адронів (пі-мезони, каони, протони, та  $\Lambda$  баріони) у протон-протонних та ядро-ядерних зіткненнях із використанням транспортних моделей UrQMD та HSD. Основною мотивацією такого аналізу є нині триваючий експеримент NA61/SHINE у ЦЕРНі. Суттєва частина розділу власне і присвячена аналізу нових експериментальних даних, що були отримані колаборацією NA61/SHINE. Здобувачем показано, що експериментальні дані якісно добре описуються моделлю UrQMD, у той час як для кількісного опису модель потребує модифікації. Важливим результатом є роль ізоспінових ефектів при порівнянні даних про протон-протонні та ядро-ядерні зіткнення, тобто той факт, що у додачу до  $p+p$  реакцій, в ядро-ядерних зіткненнях відбуваються також і  $p+n$  та  $n+n$  реакції. Вказано, що різниця між протон-протонними та ядро-ядерними зіткненнями, яка спостерігається експериментально, більшим чином пов'язана із ізоспіновими ефектами, а не можливими ефектами середовища у ядро-ядерних зіткненнях.

Третій розділ дисертації присвячений початковій стадії ядро-ядерних зіткнень, де відбувається процес розділення системи нуклонів на “спостерігачі” (спектатори) та “учасники”. Автор побудував спрощену модель для опису процесу розділення, у якій основні результати отримано аналітично. Фізично, запропонована модель подібна до підходу Глаубера-Ситенка на оптичній границі. Власне, у підрозділі 3.2.3 показано, що у границі  $t \rightarrow \infty$  розподіл кількості спектаторів по поперечним координатам співпадає із моделлю Глаубера-Ситенка для достатньо важких ядер. Аналітична модель вказує на те, що початкова стадія зіткнення ядер характеризується часовим масштабом  $t_c$ , що однозначно визначається

початковими швидкостями ядер. Встановлено, що процес розділення завершується приблизно при  $t \approx 1.5t_c$ , де момент часу  $t = 0$  відповідає першим реакціям, що виникають при зіткненнях ядер.

У розділі також представлено детальне дослідження флюктуацій у процесі розділення на спектатори та учасники, зокрема флюктуації рапідності в системі центру мас (с.ц.м.) учасників від події до події. Ці флюктуації є важливими з точки зору порівняння результатів гідродинамічних моделей з експериментом: гідродинаміка описує еволюцію системи учасників, а внаслідок флюктуацій центру мас цієї системи, немає точного співставлення між системою відліку колайдера, у якій проводяться вимірювання, та с.ц.м. учасників. Дисертант узагальнив свою аналітичну модель для опису флюктуацій рапідності с.ц.м. учасників. В роботі показано, що флюктуації рапідності с.ц.м. описуються для широкого діапазону систем розподілом Гауса, ширина якого у першу чергу визначається центральністю зіткнення. З результату випливає, що флюктуації і пов'язані з ними ефекти є найбільш суттєвими у периферійних зіткненнях. Варто зазначити, що теоретичне передбачення здобувача щодо гаусової форми розподілу флюктуацій рапідності с.ц.м. було нещодавно підтверджено експериментально, у рамках експерименту ALICE на Великому Адронному Колайдері.

У четвертому розділі автором розвинено формалізм термодинамічного середнього поля на випадок багатокомпонентних систем у великому канонічному ансамблі. Формалізм дозволяє вивчати ефекти різних взаємодій між частинками, а узагальнення підходу на випадок багатокомпонентних систем відкриває нові застосування у галузі фізики високих енергій. Автором застосовано узагальнений підхід для дослідження ефектів взаємодії типу твердої серцевини у рівнянні стану моделі адронно-резонансного газу (АРГ), що зазвичай використовується для опису стадії хімічного фрізауту в релятивістських ядро-ядерних зіткненнях. В якості моделей взаємодії типу твердої серцевини використано підходи ван дер Ваальса та Карнагена-Старлінга. Показано, що наближення ван дер Ваальса

є достатнім якщо радіус адронів, що припускається однаковим для всіх, не перевищує приблизно 0.5 фм. Також проведено аналіз даних квантової хромодинаміки на гратці. Із умови узгодження рівняння стану АРГ із розрахунками КХД на гратці показано, що радіус адрона  $r$  обмежений інтервалом від 0.13 до приблизно 0.4 фм.

Дисертаційна робота Вовченка В.Ю. є цілісною і завершеною науковою працею, що містить оригінальні і важливі результати з актуального напрямку теоретичної фізики – зіткнення релятивістських ядер. Викладені висновки є належно обґрунтованими. Автореферат дисертації відповідає змісту дисертаційної роботи і повністю відображає її основні положення. Матеріали дисертації опубліковані в престижних міжнародних журналах і доповідались на багатьох міжнародних наукових конференціях та семінарах. Результати дисертації є корисними для коректного порівняння експериментальних даних із теоретичними моделями зіткнення ядер.

Разом з тим, є певні зауваження до дисертаційної роботи, а саме:

1. У розділі 3.2.2 запропоновано обчислення функції розподілу спектаторів як розв'язок рівняння Больцмана (3.11) з початковою умовою, яка відповідає початковій стадії процесу ядро-ядерного зіткнення. Для коректного визначення функції розподілу можна сформулювати також граничні умови на поверхні двоядерної системи (фаерболу), де різко змінюється густина числа частинок, наприклад такі, які відповідають простим гідродинамічним умовам на цій поверхні. Здається, що тоді можна було б врахувати поверхневі динамічні ефекти у поперечному напрямку, що може вплинути на поперечний розподіл спектаторів.
2. Вираз (4.35), залежний від температури, представлено в дисертації як «гамільтоніан класичного взаємодіючого большманівського газу». Але температура може з'явитися тільки після статистичного

усереднення, наприклад, в наступному виразі (4.36) для статистичної суми.

3. У підрозділі 2.5.2 вводиться параметр  $T$  – параметр нахилу у поперечному імпульсному спектрі. Цей параметр легко спутати із температурою, що має таке саме позначення та таку ж розмірність у розділі 4, хоча параметр нахилу не має прямого відношення до температури. Це все варто було б зазначити у явному вигляді в тому розділі, де величина  $T$  вперше з'являється.

Представлені зауваження ніяким чином не зменшують наукової цінності роботи, і не впливають на достовірність отриманих результатів. Враховуючи також актуальність дисертаційної роботи, новизну та обґрунтованість отриманих наукових результатів, вважаю, що дисертація В.Ю. Вовченка «Еволюція взаємодіючої багаточастинкової системи, що виникає у зіткненнях релятивістських ядер» відповідає всім вимогам МОН України щодо дисертацій, а її автор Вовченко Володимир Юрійович заслуговує на присудження йому ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

Офіційний опонент  
провідний науковий співробітник  
відділу теорії ядра Інституту  
ядерних досліджень НАН України,  
доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник

О.Г. Магнер

Підпис О.Г. Магнера засвідчує:  
Вчений секретар Інституту ядерних  
досліджень НАН України



Н.Л. Дорошко