

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

на дисертаційну роботу **Набоки Владислава Юрійовича**

“Термалізація та еволюція сильновзаємодійної матерії в інтегрованій гідрокінетичній моделі ядро-ядерних зіткнень”, яку подано на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика

Сучасні прискорювачі частинок та атомних ядер відкривають принципово нові перспективи в експериментальних дослідженнях такого важливого фундаментального стану матерії як кварк-глюонна плазма, а також пов'язаних з нею екзотичних частинок, які неможливо утворити при звичайних умовах. Разом з експериментами по зіткненням ультрарелятивістських важких йонів виникає необхідність моделювання просторочасової картини процесів зіткнень, а також теоретичного обґрунтування різних спостережуваних, таких як спектри частинок різного сорту, коефіцієнти анізотропії, в'язкості та інші. Побудова повної теорії кварк-глюонної плазми досі залишається відкритим питанням в силу значно нетривіальної еволюції цієї рідини при сильній константі зв'язку, але значна увага приділяється моделям на основі релятивістської гідродинаміки. Дисертаційна робота В. Ю. Набоки виконана саме в цьому актуальному і важливому напрямку і присвячена побудові інтегрованої гідрокінетичної моделі ядро-ядерних зіткнень, що описує еволюцію народженої завдяки цим зіткненням матерії, а також застосуванню гідрокінетичної моделі в інших аспектах вивчення кварк-глюонної плазми.

Представлені в дисертації результати досліджень виконані у відділі фізики високих густин енергії Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова Національної академії наук України в рамках державної програми “Дослідження сильновзаємодіючої матерії та структури адронів в релятивістських зіткненнях адронів та ядер”. (Номер державної реєстрації – 0113U001092, шифр – 1.4.1.). Усі результати дисертаційної роботи отримані за допомогою добре відомих методів і підходів сучасної теоретичної фізики, таких як методи квантової теорії розсіювання, теорія каскадних процесів зіткнень, релятивістська гідродинаміка, квантова теорія поля і фізика елементарних частинок, а її наукова новизна складається з:

- проведення в рамках релаксаційної моделі моделювання термалізації початкового стану матерії, що утворюється в процесі ультрарелятивістського ядро-ядерного зіткнення, та отримання профілів густини енергії та швидкості для часу термалізації;
- побудови інтегрованої гідрокінетичної моделі ядро-ядерних зіткнень, що описує еволюцію матерії від початкового етапу формування матерії до кінцевого етапу розльоту окремих частинок та розрахування за допомогою цієї моделі значень різних спостережуваних для експерименту ALICE на Великому Адронному Колайдері (LHC) (множинність заряджених частинок для різних центральностей, спектри, інтерферометричні радіуси, коефіцієнти анізотропії);

- розрахунку в рамках гідрокінетичної моделі залежності інтерферометричних радіусів для π -мезонів та K -мезонів від імпульсу, передбачення скейлінга цих інтерферометричних радіусів по поперечному імпульсу та отримання виразу для повздовжніх інтерферометричних радіусів, за допомогою якого можна отримати час максимального випромінювання.

Нові результати добре обгрунтовані, проведено їх порівняння з раніше отриманими в формалізмі гідрокінетичної моделі результатами інших авторів. Порівняння з експериментом доводить спроможність моделі описувати експериментальні дані так що природним висновком є релевантність інтегрованої гідрокінетичної моделі для опису широкого кола спостережуваних при одних і тих же параметрах. Результати дисертації є важливими як для планування та розробки нових експериментів по зіткненням ультрарелятивістських важких йонів, так і для побудови остаточної теорії кварк-глюонної плазми.

Дисертація виконана на високому теоретичному рівні, дуже добре оформлена. Загальним враженням від роботи є то, що вона написана сформованим фахівцем для фахівців. З моєї точки зору це є як сильною, так і водночас слабкою стороною дисертації, оскільки зацікавленому неспеціалісту неможливо розібратися в предметі без звернення до додаткових, крім дисертаційної роботи, джерел. Закордонні дисертації рівня PhD як правило вільні від цього “недоліка”.

Ще раз підкреслю, що рівень роботи дуже добрий, дійсно високий, але на жаль в ній присутні певні недоліки. Серед них зазначу наступні:

- 1) В усіх розділах дисертації використовується значення температури $T = 165$ MeV як температура ізотерми, на якій відбувається перехід від гідродинамічного опису еволюції матерії до її опису як адронного газу. Проте не вказується, чому вибране таке значення.
- 2) В розділах 1 та 2 для моделювання імпульсної поведінки інтерферометричних радіусів та для розрахунку кореляційних функцій використовується нев'язка гідрокінетична модель без претермальної стадії, хоча в останньому розділі дисертації побудована “нова” модель, що враховує ефекти в'язкості та поступової термалізації на ранній стадії зіткнення. Виникає питання, чому використання “старої” моделі досить для розв'язку вищезгаданих задач.
- 3) Побудована в розділі 4 інтегрована гідрокінетична модель використана для моделювання зіткнень тільки при енергії 2.76 TeV. При цьому не наведено порівняння з експериментом при будь-яких інших енергіях. Тому залишається незрозумілим чи запропонована модель “зафітована” тільки під зазначену енергію зіткнень чи вона також добре працює і в інших діапазонах енергій.
- 4) Відзначу деякі недоліки в оформленні дисертації. В тексті присутня низка описок та граматичних огріхів. (Див., напр., перший абзац на стор. 10; друге речення після рів. (1.10) на стор. 18; друге речення на стор. 54,

кінець/початок стор. 54-55; друге речення 3-го абзаца на стор. 80). Список умовних позначень є явно неповним і мав би бути доповненим скороченнями, що часто зустрічаються в тексті, такими як UrQMD, MC-Glauber, MC-KLM, IP-Glasma, iHKM та ін. Це значно б покращило презентацію роботи і допомогло б уникнути ситуації, коли скорочення UrQMD вперше зустрічається на стор. 12, а його розшифровка - на стор. 51. Деякі позначення в математичних виразах залишаються без розшифровки (напр. на стор. 12, 15, 19), в постановці завдань і обговоренні результатів недостатньо чітко вказується які моделі і фізичні величини маються на увазі. Наприклад, дуже часто мова йде про в'язкість, але не вказується чи це зсувна чи об'ємна в'язкість; теж саме стосується і гідродинамики Ізраеля-Стюарта, коли у відсутності цитування на першоджерело цілком незрозуміло першого чи другого порядку гідродинамика має бути застосована. Також не вказується з якої фізичної величиною пов'язаний хімічний потенціал, що вводить. Ці незручності ускладнюють сприйняття роботи.

5) Список використаних джерел хоча і є оптимальним, але не є вичерпним. На жаль в ньому відсутні посилання на монографії з різних аспектів фізики важких йонів, що вийшли за кордоном за останні роки. Наводиться лише одне посилання на гравітаційно-калібрувальну дуальність (посилання [23]), напрямок, що бурхливо розвивається у зв'язку з застосуванням методів AdS/CFT відповідності теорії струн у фізиці важких йонів. Тому досить дивним виглядає використання у роботі мінімального граничного значення відношення зсувної в'язкості до щільності ентропії, рівного 0.08, і відсутність посилання на роботу Ковтуна-Сона-Старинця, в якій це значення з'явилося вперше і було обчислено в рамках гравітаційно-калібрувальної дуальності.

Наведені зауваження ні в якому разі не знижують загального позитивного враження від дисертації і ніяким чином не мають впливу на дуже добрий рівень отриманих дисертантом результатів. Дисертаційна робота В. Ю. Набоки є цілісною і завершеною науковою працею, що містить оригінальні і важливі результати з актуального напрямку в сучасній теоретичній фізиці – дослідження просторочасової структури ультрарелятивістських ядро-ядерних зіткнень. Результати дисертації є новими та належним чином обґрунтованими. Побудована в дисертації модель ядро-ядерних зіткнень є вдосконаленим варіантом гідродинамічної моделі і може бути використана для моделювання ядро-ядерних зіткнень, в тому числі таких, для яких не було виконано відповідних експериментів. Текст дисертації написаний з належною фізичною та математичною строгістю і з використанням прийнятої в даній науковій галузі термінології.

Результати дисертації своєчасно і в повному обсязі опубліковано у 6 статтях у провідних фахових наукових журналах. Дисертаційна робота та зроблені в ній висновки цілком відповідають змісту опублікованих наукових праць. Серед наукових праць немає тотожних за змістом.

Матеріали дисертації були апробовані та обговорювалися на міжнародних наукових конференціях, школах та семінарах. Автореферат повністю відповідає змісту дисертації та вірно відображає її основні положення.

Враховуючи актуальність теми дисертаційної роботи, значний об'єм виконаних досліджень, наукову новизну застосованих в дисертації методів, цінність та обґрунтованість отриманих наукових результатів, вважаю, що дисертація В. Ю. Набоки "Термалізація та еволюція сильновзаємодійної матерії в інтегрованій гідрокінетичній моделі ядро-ядерних зіткнень" цілком відповідає всім вимогам МОН України щодо кандидатських дисертацій, а її автор, Владислав Юрійович Набока, заслуговує на присудження йому наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

Офіційний опонент
доктор фізико-математичних наук,
провідний науковий співробітник
Інституту теоретичної фізики ім. О.І.Ахієзера

Нурмагамбетов О. Ю.

Підпис Нурмагамбетова О. Ю. засвідчує:

