

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Набоки Владислава Юрійовича *“Термалізація та еволюція сильновзаємодійної матерії в інтегрованій гідрокінетичній моделі ядро-ядерних зіткнень”*, представленої на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

Актуальність теми. Впродовж останніх років проводиться активний пошук нового стану речовини – кварк-глюонної плазми, яка, можливо, утворюється у високоенергетичних ядро-ядерних зіткненнях. Експериментально добре встановлено що на проміжній стадії ядро-ядерного зіткнення речовина поводить себе як рідина. Вирішення питання моделювання переходу від рідини до адронного газу на останньому етапі гідродинамічної еволюції, на якому вже не задовольняється умова локальної рівноваги, а також побудова загальноприйнятої моделі нерівноважної динаміки та термалізації початкового стану залишаються поки що не до кінця завершеними задачами. В роботі дисертанта, яка присвячена переходу від початкових станів матерії до її гідродинамічного розширення дослідженню цей пробіл суттєво ліквідовано.

Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаних джерел.

Основною метою дисертаційної роботи було дослідження претермальної стадії еволюції матерії, що утворена в ультрарелятивістських зіткненнях ядер свинцю при енергії LHC 2.76 TeV на нуклонну пару, від генерації нерівноважного початкового стану до її термалізації і початку в'язкої гідродинамічної еволюції. Основу увагу було приділено моделюванню претермальної стадії ядро-ядерного зіткнення на основі релаксаційної моделі та моделюванню ядро-ядерного зіткнення від початкової до кінцевої стадії за допомогою інтегрованої гідрокінетичної моделі.

У першому розділі дисертації проведено аналіз залежності фемтоскопічних масштабів для мезонних та баріонних пар від поперечної маси та імпульсу та з'ясуванню причин сильного порушення скейлінгу інтерферометричних радіусів для каонів та піонів по поперечній масі.

Другий розділ присвячено дослідженню кореляційних функцій $p\Lambda$ та $p\bar{\Lambda}$ та отриманню інформації про характер еволюції матерії, утвореної в ядро-ядерних зіткненнях, зокрема про характер колективного потоку.

У третьому розділі дисертаційної роботи проведено моделювання претермальної стадії ядро-ядерного зіткнення. Використовуючи метод, що базується на законах збереження енергії-імпульсу, що пов'язані з релаксаційною транспортною динамікою, виражених для тензора енергії-імпульсу, що еволюціонує до гідродинамічної форми, а також використовуючи параметр часу релаксації, було оцінено гідродинамічний тензор енергії-імпульсу в передбачуваний момент термалізації. Також було проведено чисельну реалізацію цього методу для дослідження зв'язку між локально ізотропним та анізотропним в імпульсному просторі початковими станами, та рівноважними початковими умовами для подальшої гідродинамічної еволюції в релятивістських ядерних зіткненнях.

У четвертому розділі дисертаційної роботи з метою завершення опису ядро-ядерних зіткнень, до рівнянь гідродинаміки було додано генератор початкового нерівноважного стану та ультрарелятивістську квантову молекулярну динаміку, що

симулює еволюцію адронів після адронізації, внаслідок чого вдалось в рамках інтегрованої гідрокінетичної моделі розділити еволюцію матерії в процесі ядро-ядерного зіткнення на п'ять стадій.

Найбільш вагомими науковими результатами, які були одержані Набокою В.Ю. у його дисертаційній роботі, є такі:

1. На базі розробленої комп'ютерної програми в рамках релаксаційної моделі претермальної стадії, що описує перехід від початкового нерівноважного стану до локально рівноважного стану, було проведено дослідження залежності претермальної стадії від коефіцієнту анізотропії та рівняння стану.

2. Побудована інтегрована гідрокінетична модель ядро-ядерних зіткнень, що описує еволюцію матерії в процесі ядро-ядерного зіткнення від початкової стадії формування матерії до кінцевої стадії розльоту адронів, та отримані значення спектрів, коефіцієнтів анізотропії всіх заряджених частинок та піонні інтерферометричні радіуси для експерименту по зіткненням ядер свинцю на LHC з енергією 2.76TeV при різних центральностях.

3. Встановлено, що основними причинами порушення скейлінгу інтерферометричних радіусів по поперечній масі є перерозсіяння частинок та інтенсивні поперечні потоки. Передбачено наявність скейлінгу інтерферометричних радіусів по поперечному імпульсу, що пізніше було підтверджено в експерименті.

Усі основні наукові результати дисертаційної роботи Набоки В.Ю. були отримані вперше. Наукові висновки, що наведені у дисертації, є достатньо обґрунтованими і достовірними. Отримані у дисертаційній роботі результати мають важливу практичну цінність для аналізу високоенергетичних ядро-ядерних зіткнень. Результати дисертаційної роботи доповідались на 4 міжнародних конференціях, за матеріалами дисертації було опубліковано 6 робіт у міжнародних фахових виданнях, які повністю відображають зміст роботи.

Аналіз дисертаційної роботи Набоки В.Ю. показав, що поряд з великим позитивним надбанням до неї можна пред'явити і певні претензії. Зокрема, слід зробити такі **зауваження**:

1. Останнім часом в ряді робіт (див. наприклад,

a) D.T. Son and N. Yamamoto, Kinetic theory with Berry curvature from quantum field theories, Phys. Rev. D 87, 085016 (2013).

б) M. A. Stephanov and Y. Yin, Chiral Kinetic Theory, Phys. Rev. Lett. 109, (2012);

с) J. Y. Chen, D. T. Son, M. A. Stephanov, H. U. Yee, and Y. Yin, Lorentz Invariance in Chiral Kinetic Theory, Phys. Rev. Lett. 113, 182302 (2014))

було продемонстровано, що в релятивістському рівнянні Больцмана у випадку, коли воно застосовується для дослідження ультрарелятивістських систем та систем, що знаходяться під дією сильного магнітного поля, необхідно враховувати так звану кривизну Беррі, яка є одним з найважливіших інгредієнтів релятивістської кінетичної теорії, що дозволяє набагато більш повно уловити особливості поведінки частинок, які мають ферміонну природу, та за допомогою якої враховуються особливості спінових властивостей складових системи, що

досліджується. В дисертаційній роботі еволюція до локальної рівноваги матерії, утвореної в ультрарелятивістських зіткненнях важких йонів, симулюється за допомогою релятивістського рівняння Больцмана, в якому ця кривизна Беррі не врахована.

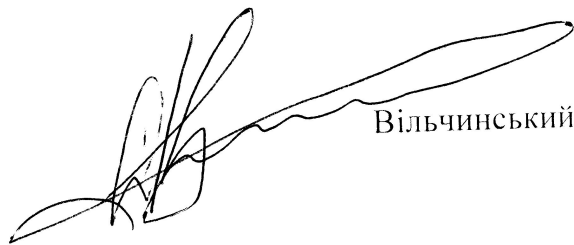
2. Формула Ледницького-Любошица, як відомо, використовується для вивчення розмірів і форми області взаємодії високоенергетичних частинок на основі аналізу особливостей поведінки кореляційної функції при малих значеннях відносного імпульсу. В дисертації за допомогою цієї формули виконуються передбачення для кореляційних функцій пар p_Λ та $p_{\bar{\Lambda}}$, для чого проводиться апроксимація експериментально вимірної кореляційної функції $C_{uncorr}(k^*)$ аналітичним виразом, в який входять так звані “справжня” та залишкова кореляційні функції. Цю апроксимацію слід було обґрунтувати. Також залишається незрозумілим яким чином дане апроксимаційне співвідношення враховує особливості статистики взаємодіючих частинок.

3) Варто було б більш детально порівняти всі отримані у дисертації теоретичні результати з реальними експериментальними даними.

Однак, вказані зауваження є скоріше побажаннями і не ставлять під сумнів основні положення, висновки і наукову новизну дисертаційної роботи. У дисертаційній роботі вирішено важливе наукове завдання – описано процес термалізації початково нерівноважної матерії, після якого була застосована гідродинамічна модель та на її основі досліджено просторово-часову структуру ультрарелятивістських ядро-ядерних зіткнень та було описано спостережувані дані, які отримані при проведенні експериментів колаборацією ALICE на LHC

Дисертаційна робота Набоки В.Ю. “Термалізація та еволюція сильновзаємодійної матерії в інтегрованій гідрокінетичній моделі ядро-ядерних зіткнень” є завершеною науковою працею з актуальної теми, містить наукову новизну, має практичну цінність і відповідає усім вимогам щодо кандидатських дисертацій. Автореферат повністю відображає її зміст, дисертація відповідає спеціальності 01.04.02 – теоретична фізика, а сам автор заслуговує присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук.

доктор фіз.-мат. наук, професор
зав. кафедрою квантової теорії поля
фізичного факультету
Київського національного
університету імені Тараса Шевченка



Вільчинський С.І.

