

Відгук офіційного опонента

на дисертаційну роботу

Аджимамбетова Мусфера Даніяровича

“Спектри та кореляції частинок в ядро-ядерних і протон-протонних зіткненнях з високою енергією та множинністю”,

подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії

за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія»

Актуальність теми дисертаційної роботи.

Дисертаційна робота Аджимамбетова М.Д. присвячена теоретичному аналізу характеристик систем, що утворюються при ультра-релятивістських зіткненнях ядер, в т.ч. найлегших з них, ядер водню (протонів). Експерименти в ЦЕРН (Женева, Швейцарія) на Великому Адронному Колайдері (LHC) (ALICE, CMS, ATLAS, LHCb) та SPS (SHINE), в Брукгейвенській Національній Лабораторії США (RHIC) (STAR, PHENIX) та GSI, ФРН (HADES) націлені на дослідження у лабораторних умовах властивостей матерії за нових масштабів простору і часу, характерних для кварк-глюонних ступенів свободи та високих густин енергії. Системи, що утворюються у таких зіткненнях, сягають високих температур та щільностей, які можуть зумовити трансформацію початкового адронного стану до кварк-глюонної плазми. Гіпотетично такий тип матерії існує у ядрах компактних астрономічних об'єктів, таких як нейтронні зірки, а також мав місце у ранньому Всесвіті протягом мікросекунди після Великого Вибуху. Однак спостерігати кварки та глюони безпосередньо в експерименті неможливо. Натомість характеристики системи відновлюють, аналізуючи виміряні в експерименті розподіли фізичних подій (за поперечним імпульсом, кутовими розподілами, еліптичними потоками, тощо) та кореляційні функції кінцевих продуктів зіткнення, а саме, адронів, фотонів та лептонів. Тому розробка та удосконалення методів аналізу та інтерпретація результатів таких експериментів є актуальною задачею сучасної фізики високих енергій і становлять основний здобуток досліджень дисертаційної роботи М.Д. Аджимамбетова.

Структура дисертації

Дисертаційна робота складається з анотації (українською та англійською мовами), вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних

джерел (126 найменувань), а також додатку з переліком публікацій здобувача та відомостями про апробацію результатів. Рукопис викладений на 145 сторінках друкованого тексту та включає 31 рисунок та 5 таблиць.

У **Вступі** дисертації обґрунтовано вибір теми досліджень, зв'язок з науковими темами, викладено мету і завдання дослідження, описано наукову новизну отриманих у дисертації результатів та їх практичне значення, вказано особистий внесок здобувача і представлено перелік наукових конференцій і семінарів, на яких доповідалися результати дисертації.

Перший розділ присвячений опису динаміки системи, що народжується в ультрарелятивістських ядро-ядерних зіткненнях, в рамках інтегрованої гідрокінетичної моделі (iHKM). Дисертантом охарактеризовано більшість спостережуваних величин та їх розподілів, виміряних в експериментах по зіткненню ядер золота на прискорювачі RHIC та ядер ксенону на LHC. Результати порівнюються з даними інших експериментів. Оцінено основні параметри моделі iHKM та виявлено її нові особливості. Досліджено зв'язок між початковими умовами адронної матерії з часом термалізації та рівнянням стану. Для експериментів при нижчих енергіях, які націлені на дослідження фазової діаграми квантової хромодинаміки, та, зокрема, пошук критичної точки, обґрунтовано гіпотезу про неповну хімічну рівновагу дивних кварків, яка визначає феноменологічний зв'язок між пригніченням утворення дивних адронів, спостережуваних в кінцевому стані, та часом життя системи у фазі кварк-глюонної плазми.

Серед результатів, отриманих у дисертації та представлених у **Другому розділі**, наголос зроблено на розрахунках довжин однорідності піонів та каонів в широкому діапазоні поперечних імпульсів частинок та центральностей зіткнення в експериментах на RHIC. Це дозволило дослідити просторово-часову еволюцію емісії піонів та каонів із системи, що досліджується. Зокрема, наведено розрахунки для оцінки часів максимального випромінювання відповідних адронів. Порівняльний аналіз цих розрахунків з аналогічними для інших експериментів дозволив зробити цікавий висновок про затримку випромінювання каонів внаслідок процесів у адронній фазі еволюції системи.

В цьому розділі була також перевірена гіпотеза скейлінгу інтерферометричного об'єму системи з множинністю народження частинок. При моделюванні чотирьох різних експериментів за однакових множинностей, дисертантом було виявлено відмінність інтерферометричних об'ємів, яка перевищує похибки експериментів більш ніж вдвічі. У дисертації була встановлена кореляція між початковими розмірами палаючої адронної

системи (фаєрболу) та кінцевими довжинами однорідності випромінювання частинок.

Третій розділ дисертації присвячений теоретичному аналізу інтерферометрії у малих системах, а саме у протон-протонних зіткненнях на Великому Адронному Колайдері (ЦЕРН). Колабораціями ATLAS та CMS спостерігалось нетипове для ядро-ядерних зіткнень насичення інтерферометричних розмірів системи у протон-протонних зіткненнях з великою множинністю кінцевого стану.

Для інтерпретації цих експериментальних результатів у дисертації запропонована точно розв'язувана квантово-польова модель для випромінювання піонів у протон-протонних зіткненнях при великих множинностях. Дисертантом було вказано, що стандартна інтерпретація інтерферометричних розмірів як довжин однорідності у ядро-ядерних зіткненнях, яка отримується в рамках квазікласичного наближення, не є застосовною до протон-протонних експериментів у зв'язку з малістю системи у порівнянні з тепловою довжиною піонів та каонів. Згідно з результатами, отриманими у дисертаційній роботі, випромінювання окремих частинок із таких систем не є незалежним. Показано, що у системах з великими множинностями може утворитись Бозе-Ейнштейнівський конденсат, який спричиняє когерентну емісію частинок та дозволяє пояснити низьке значення так званого інтерсепту.

У **Четвертому розділі** представлено розвиток дослідження інтерферометрії у протон-протонних зіткненнях отримало. Розширення моделі, запропонованої у третьому розділі, полягає в моделюванні гідродинамічного потоку та селекцією подій з фіксованою множинністю.

Дисертантом показано, що при такому відборі подій, когерентність виникає внаслідок конденсації частинок на основному рівні статистичного оператора системи. У запропонованій моделі спостерігалось як насичення інтерферометричних розмірів системи, так і пониження інтерсепту кореляційних функцій зі збільшенням множинності. Ці ефекти посилюються зі збільшенням інтенсивності гідродинамічних потоків у системі. Одержані результати важливі для розуміння процесів протон-протонних зіткнень.

В цілому, дисертаційна робота Аджимамбетова Мусфера Данієровича містить оригінальні та вагомі результати з актуального напрямку фізики високих енергій по дослідженню властивостей матерії, утвореної в ядро-ядерних зіткненнях, та її еволюції через кварк-глюонні ступені свободи до багаточастинкових кінцевих станів. Матеріали дисертації опубліковані в фахових міжнародних виданнях з високим імпаکت індексом. Позитивна

апробація цих результатів засвідчена численними презентаціями на наукових конференціях та семінарах.

Однак, до дисертації можна також висловити окремі зауваження та побажання:

1. У вступі до першого розділу згадується, що окрім адронів у колайдерних експериментах також реєструють фотони та лептони, проте при обговоренні результатів спостережувані величини, пов'язані з цими частинками, не згадуються взагалі. Не зрозуміло, чи існує принципова можливість описання спостережуваних характеристик фотонів та ди- лептонів в рамках розвинутої в дисертації моделі.

2. Як показано в дисертації, інтегрована гідро-кінетична модель здатна описувати сучасні експерименти по зіткненню ультра релятивістських ядер. Проте варто було б більш детально визначити межі застосування цієї моделі. Це стосується як майбутніх експериментів за більш високих енергій, так і існуючих експериментів за менших енергій.

3. У третьому розділі не до кінця зрозумілими є зв'язок між кількістю частинок у аналітичній моделі протон-протонних зіткнень та множинністю заряджених частинок у експериментах. Так на Рис. 3.2. діапазон множинності сягає 250 частинок, а на Рис. 4.3. наведено дані при набагато менших значеннях кількості (до 20 чи 60) частинок.

4. У дисертації використовується термін “довжина однорідності”. Означення, наведене у дисертації, недостатньо розкриває фізичний зміст цієї величини. Доречно навести приклади модельних розрахунків, в яких зв'язок довжини однорідності та реальних розмірів системи був би прозорим.

5. Жаргонне слово «інтерсепт» потрібно замінити на відповідний термін українською мовою, маючи на меті важливість майбутнього представлення результатів цікавого дослідження в лекціях для студентів чи в інтерв'ю для мас-медіа.

Висловлені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку виконаної наукової роботи. Враховуючи актуальність, новизну та важливість одержаних результатів, їх обґрунтованість і достовірність, а також практичну цінність сформульованих положень і висновків, вважаю, що робота «Спектри та кореляції частинок в ядро-ядерних і протон-протонних зіткненнях з високою енергією та множинністю» відповідає всім вимогам, встановленим МОН України до дисертаційної роботи, а її автор, Аджимамбетов Мусфер Даніярович цілком заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія».

Офіційний опонент

Доктор фіз.-мат. наук,

Професор,

Член кореспондент НАН України,

Завідувач відділу фізики високих енергій

Інституту ядерних досліджень НАН України

Валерій ПУГАЧ

Підпис В.М. Пугача засвідчую:

Вчений секретар

Інституту ядерних досліджень НАН України

Канд. фіз.-мат. наук



Наталія ДОРОШКО