

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Шаповала Володимира Миколайовича

“Моделювання еволюції сильновзаємодійної матерії

у високоенергетичних зіткненнях важких ядер”,

яка подається на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук

за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика

У своїй дисертаційній роботі “Моделювання еволюції сильновзаємодійної матерії у високоенергетичних зіткненнях важких ядер” В. М. Шаповал розглянув важливі аспекти сучасної фізики високих енергій з теоретичних досліджень динаміки систем, які формуються у релятивістських зіткненнях важких ядер. Незважаючи на надзвичайно малі розміри та час життя цих систем, вони мають неоднорідну структуру. З огляду на це процес їх еволюції можна поділити на декілька стадій, кожна з яких має свої характерні особливості і потребує специфічної теоретичної інтерпретації.

Актуальність теми дослідження зумовлена тим, що вищезгадані системи активно досліджують в сучасних експериментах на потужних прискорювачах, зокрема на Великому адронному колайдері (LHC) у ЦЕРНі та на Релятивістському колайдері важких іонів (RHIC) у Брукхевенській національній лабораторії (США), маючи на меті всебічний аналіз властивостей нових форм сильновзаємодійної матерії, які утворюються у зіткненнях ядер за високих енергій. Однією з таких екзотичних форм матерії є кварк-глюонна плазма (КГП). В рамках фазової діаграми квантової хромодинаміки такий стан з кольорово зарядженими (майже не взаємодіючими) кварками і глюонами може утворитись в результаті фазового переходу від початково безбарвної (до зіткнення) ядерної матерії.

В колайдерних експериментах на LHC зазвичай розглядають перехід до КГП при високій температурі та помірній густині, в той час як в режимі зіткнень з фіксованою мішенню граничний перехід характеризують надвисокою густиною та помірною температурою КГП. Властивості кварк-глюонної плазми з неослабним інтересом досліджуються як у сучасних, так і плануються в майбутніх (CBM@FAIR, Darmstadt) експериментах з ядро-ядерних зіткнень. Одним з мотивуючих факторів таких досліджень є відтворення в лабораторії умов еволюції раннього Всесвіту, коли за уявленнями Стандартної Моделі у стані кварк-глюонної плазми перебувала вся матерія протягом кількох мікросекунд. Комп’ютерні симуляції важливі для дослідження динаміки цих процесів та коректної інтерпретації результатів експериментальних вимірювань.

Дисертація В. М. Шаповала оформлена у вигляді наукової доповіді за матеріалами 14 статей у провідних фахових виданнях, 7 з яких відносяться до квартилю Q1, 6 – до квартилю Q2, і 1 стаття – до квартилю Q3 за даними SCImago Journal and Country Rank. Дисертаційна робота містить усі необхідні елементи, перелічені у вимогах МОН України, такі як титульний аркуш, анотація, список наукових праць за темою дисертації, зміст, перелік умовних позначень тощо. Основний текст дисертації складається зі вступу, трьох розділів, поділених на підрозділи, кожен з яких відповідає одній опублікованій статті, та висновків. Наприкінці також наведено подяки, список використаних джерел, який включає 129 посилань, та додаток зі списком публікацій і даними про апробацію. Результати дисертації представлено в доповідях на численних міжнародних та всеукраїнських фахових конференціях, тези 9 з них опубліковано у збірках матеріалів і тез наукових конференцій.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дослідження, наводиться короткий огляд сучасного стану досліджень ядро-ядерних зіткнень при високих енергіях, визначені мета і завдання, об'єкт і предмет дослідження, представлено використані методи. Наведено інформацію про наукову новизну, теоретичне і практичне значення отриманих результатів, особистий внесок автора дисертації.

Перший розділ дисертації присвячено опису адронних спостережуваних «м'якої» фізики в рамках інтегрованої гідрокінетичної моделі ядро-ядерних зіткнень (iHKM) для інтерпретації зіткнень ядер свинцю при енергії 5,02 TeV в с.ц.м. пари нуклонів на Великому адронному колайдері. Калібрування моделі виконано вперше для цієї енергії з використанням двох рівнянь стану кварк-глюонної матерії на гідродинамічному етапі еволюції системи і відповідних їм температур партиклізації (переходу від гідродинаміки до опису системи як набору частинок). Для обох рівнянь стану отримано задовільний опис експериментальних даних стосовно виходів адронів, їх відношень, розподілів за поперечним імпульсом. Розраховано передбачувані фемтоскопічні радіуси піонів та каонів, як областей звідки випромінюються частинки з близькими швидкостями. Вимірювання фемтоскопічних радіусів є єдиним прямим методом аналізу просторово-часової структури розглядуваних систем. Цей факт свідчить про високу наукову цінність відповідних результатів, отриманих в дисертації.

Здобувачем встановлено, що близькість результатів, одержаних з двома розглянутими рівняннями стану, спричинена перенормуванням початкового значення густини енергії в центрі системи та компенсаторним впливом адронної стадії на кінцеві значення спостережуваних фізичних величин.

Також досліджено залежність результатів моделювання від параметрів моделі, що задають початковий профіль густини енергії. З'ясовано, що при збільшенні енергії

зіткнення від 2,76 до 5,02 TeV на нуклонну пару фемтоскопічні масштаби майже не зростають, що можна пояснити посиленням просторової неоднорідності через зростання колективних швидкостей, при одночасному збільшенні загальних розмірів системи.

Досліджено характер поведінки піонних фемтоскопічних радіусів в області малих поперечних імпульсів. Для надм'яких піонів виявлено відхилення імпульсної залежності радіусів від степеневого закону, типового для області середніх імпульсів.

У **другому розділі** досліджується вплив адронної стадії зіткнення на кінцеві результати і, відповідно, проблема вибору між підходами миттєвого і поступового “фріз-ауту” хімічного складу та спектрів поперечного імпульсу системи. Аналізуючи кількості короткоживучих резонансів $K^*(892)$ та довгоживучих резонансів $\phi(1020)$, що визначаються за продуктами їх розпаду, в різні моменти часу після адронізації системи, дисертант приходить до висновку, що адронна стадія суттєво впливає на видимі виходи короткоживучих K^* (з часом життя порядку 5 фм/с) і слабо впливає на виходи довгоживучих ϕ -мезонів. Відповідно, адронна стадія продовжує впливати на адронні спостережувані ще протягом 5-10 фм/с після завершення гідродинамічної стадії зіткнення. Ефект зменшується при переході від центральних до периферичних зіткнень. Отриманий результат є вагомим аргументом на користь застосування підходу поступового фріз-ауту при описі еволюції такої системи.

Здійснено також оцінки часу випромінювання піонів і каонів для зіткнень ядер при різних ультрарелятивістських енергіях та центральностях. Встановлено, що час випромінювання каонів більший, ніж для піонів. Це можна пояснити інтенсивними адрон-адронними взаємодіями на фінальній стадії зіткнення, в тому числі за участі резонансу K^* , який є важливим джерелом вторинних каонів. Також було оцінено тривалість гідродинамічної стадії зіткнення. Запропоновано новий метод оцінки загального часу життя системи на основі фітування спектрів поперечного імпульсу та поздовжніх фемтоскопічних радіусів в області малих імпульсів.

Третій розділ присвячено кореляційному аналізу баріон-баріонних взаємодій у кінцевому стані. Дисертант запропонував новий підхід до опису кореляцій, що виникають у зіткненнях важких ядер між баріонами за рахунок сильної взаємодії. При цьому враховується просторовий розподіл відстаней між баріонами, отриманий з інтегрованої гідрокінетичної моделі, а також ефект так званих залишкових кореляцій між вторинними частинками, народженими в результаті розпаду скорельованих материнських частинок. Використання запропонованого підходу дозволило вирішити проблему невідповідності між ефективними радіусами джерел емісії пар протон-лямбда та протон-антилямбда у експериментальних даних колаборації STAR, отриманих в зіткненнях ядер золота на

колайдері RHIC. Виконано оцінки дійсної та уявної частини довжини розсіяння сильної взаємодії між антипротоном та лямбда-гіпероном. Ці оцінки були використані для передбачення баріон-(анти)баріонних кореляційних функцій для зіткнень важких ядер на колайдері LHC.

Перелічені результати дисертаційного дослідження **мають** вагому **наукову новизну**. Вони є добре обґрунтованими і отримані в рамках надійної, розвинутої моделі релятивістських ядро-ядерних зіткнень iHKM, яка добре зарекомендувала себе при описі основних адронних спостережуваних. Сукупність одержаних результатів детально і чітко представляє певний завершений фрагмент еволюції сильновзаємодійної матерії у зіткненнях ядер за найвищих енергій сучасних прискорювачів. Ці результати стали основою подальшого розвитку теоретичних уявлень про особливості динаміки подібних систем, а також можуть бути використані при інтерпретації даних вимірювань та плануванні нових експериментів.

Деякі зауваження і побажання до дисертації:

1. У формулюванні висновку 6 (автореферат або с. 225-226 дисертації) фігурують невдалі терміни: «недостача» 20 %, «втрата» 70 % рекомбінація «додаткових» 50% $K^*(892)$ мезонів від початкової кількості, розрахованої у моделі iHKM. На мій погляд в майбутньому варто знайти адекватні переклади відповідних результатів, представлених в статті за участі автора «Nuclear Physics A Volume 968, December 2017, Pages 391-402».
2. На Рис. 8, 9 підрозділу 1.2 виходи резонансу K^* у інтегрованій гідрокінетичній моделі виглядають помітно завищеними порівняно з експериментальними даними. В тексті дисертації можливою причиною неузгодженості визначено некоректне значення виходу K^* в цитованих експериментальних роботах, де відповідні дані подаються як “попередні”. Однак на графіках розділу 1.6 (Рис. 4), де також наводяться дані щодо виходів K^* і їх відношень до виходів каонів з посиланням *на ті ж самі* експериментальні роботи, експериментальні точки узгоджуються з результатами моделі. Чому точки для K^* на цих графіках відрізняються, якщо дані взято з одних і тих же статей ?
3. В дисертації розрахунки функцій джерела випромінювання виконано в рамках моделі iHKM з фітуванням функціями Гауса (як на стор. 172-173). Однак, ці фітування не відображають особливість експериментальних розподілів функцій джерела, де наявні довгі негаусові “хвости” (Рис. 3а, 3с підрозділу 2.5). Варто було

б спробувати додати адекватну фітуючу функцію джерела емісії піонів для поліпшення узгодження з даними експерименту.

4. В рамках дисертації аналізуються різноманітні адронні спостережувані, що дає змогу отримати певну інформацію про властивості кварк-глюонної плазми і динаміку еволюції сильновзаємодійної матерії. Наявні також фотонні спостережувані, які напрямую відповідають за випромінювання з кварк-глюонної фази хоча і не беруть участь у сильній взаємодії. Добре було б доповнити дослідження аналізом наявних фотонних спостережуваних.
5. Автор дисертації беззаперечно сприймає повідомлення двох міжнародних колаборацій про відкриття нового стану матерії в якості кварк-глюонної плазми. На мій погляд, таке фундаментальне явище, заслуговує на більш детальне обговорення його філософської значимості та перспективи його практичного застосування. Непроста задача, але це стане ще однією прикрасою як дисертаційних, так і інших досліджень в галузі фізики високих енергій, стимулюючи пошук та розвиток нових методів досліджень, як наприклад, започатковані в ІТФ НАН України симуляції потрібних зіткнень ядер, можливого джерела нових рис сильновзаємодійної матерії. Аби в симуляціях були розроблені методи ідентифікації таких подій, вони створили б новий базис для аналізу 2025 р. даних по зіткненням ряду ядер в режимі фіксованої мішені в експерименті LHCb (CERN). В цих умовах можливо, що два ядра колайдера стискають ядро газової мішені. В експерименті дуже мало ймовірно, але ж в симуляціях немає проблем з інтенсивністю пучків та товщиною мішені. Цікаві результати симуляцій стимулювали би вже існуючі пропозиції підвищення відповідних характеристик експериментів на порядки величин.

Маю зазначити, що наведені зауваження не ставлять під сумнів достовірність основних результатів дисертації чи обґрунтованість зроблених висновків і не впливають на позитивну високу оцінку роботи.

Дисертація є завершеною науковою працею автора. Результати мають наукову цінність і новизну, вони повністю викладені у представлених 14 наукових (Q1-Q2 – 13, та Q3 – 1) – публікаціях та мають достатній рівень апробації на наукових форумах в Україні та на міжнародних конференціях (зокрема, в 9 публікаціях у збірках матеріалів і тез наукових конференцій).

Реферат вірно висвітлює зміст та основні положення дисертації.

Все викладене вище дозволяє зробити висновок про те, що дисертаційна робота В. М. Шаповала “Моделювання еволюції сильновзаємодійної матерії у високоенергетичних зіткненнях важких ядер” відповідає усім вимогам пп. 7, 8, 9 “Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук”, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17.11.2021 року №1197, які висуваються до докторських дисертацій, а її автор Володимир Миколайович Шаповал заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

Завідувач відділу фізики високих енергій
Інституту ядерних досліджень
Національної академії наук України
Член-кореспондент НАН України,
доктор фізико-математичних наук,
професор



Валерій ПУГАЧ

Підпис В. М. Пугача засвідчую:

Вчений секретар Інституту ядерних досліджень
Національної академії наук України
кандидат фізико-математичних наук



Наталія ДОРОШКО