

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Шаповала Володимира Миколайовича

«Моделювання еволюції сильновзаємодійної матерії

у високоенергетичних зіткненнях важких ядер»,

що подається на здобуття наукового ступеня

доктора фізико-математичних наук

за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика

Дисертаційна робота В. М. Шаповала «Моделювання еволюції сильновзаємодійної матерії у високоенергетичних зіткненнях важких ядер» присвячена дослідженню динаміки систем, що формуються у зіткненнях ядер при ультрарелятивістських енергіях, в рамках інтегрованої гідрокінетичної моделі (iHKM). Остання дозволяє проводити реалістичні комп'ютерні симуляції процесів зіткнення (по суті, «комп'ютерний експеримент»), умовно поділяючи їх на ряд послідовних стадій, кожна з яких описується в рамках окремого теоретичного підходу. Аналізуючи кінцеві результати обчислень, пов'язані з адронними спостережуваними в області м'якої фізики, та порівнюючи їх з експериментальними даними, можна отримати інформацію про властивості нових форм сильновзаємодійної матерії (як-от кварк-глюонна плазма, КГП), що виникають на певному етапі еволюції системи, утвореної в результаті зіткнення ядер.

Актуальність теми дослідження. Тема дисертаційного дослідження є актуальною, оскільки процеси формування, еволюції і розпаду згустків кварк-глюонної плазми становлять фундаментальний науковий інтерес і є предметом уваги масштабних експериментальних програм на сучасних прискорювачах частинок. Сюди відносяться, наприклад, дослідження колаборації ALICE на Великому адронному колайдері (LHC) у Європейській організації з ядерних досліджень (ЦЕРН), а також експерименти колаборацій STAR і PHENIX на Релятивістському колайдері важких іонів (RHIC) у

Брукхевенській національній лабораторії (США). Теоретичні моделі зіткнень є незамінними для глибокого аналізу результатів експерименту та з'ясування впливу тих чи інших факторів на поведінку кінцевих спостережуваних.

Кварки і глюони є фундаментальними складовими протонів, нейтронів та інших адронів і мають кольорові заряди, асоційовані із сильною взаємодією. При цьому за нормальних умов вільні кольорові заряди спостерігатися не можуть і завжди утримуються у складі «безбарвних» адронів (явище конфайнменту). Кварк-глюонна ж плазма, для якої характерні надзвичайно висока температура та густина енергії, є особливим станом речовини, в якому відбувається *деконфайнмент* кольорових зарядів, і вони стають вільними. Надщільна та надгаряча матерія, що утворюється в ультрарелятивістських зіткненнях ядер на колайдерах RHIC та LHC, характеризується практично нульовим баріонним хімічним потенціалом і за своїми властивостями має бути дуже подібна до матерії у Ранньому Всесвіті. Утворення великої кількості s-кварків (яким супроводжується формування КГП) разом з утворенням більш важких c- і b-кварків (переважно в результаті первинного контакту ядер в ході зіткнення) створюють умови для народження численних екзотичних адронів (мульти-дивних, чарівних, красивих), властивості яких також можуть бути досліджені у вказаних експериментах та за допомогою комп'ютерних симуляцій у відповідних моделях.

Дисертаційну роботу В. М. Шаповала підготовлено у вигляді наукової доповіді за сукупністю 14 статей у престижних фахових журналах, індексованих у базах Scopus та/або Web of Science Core Collection (13 з них належать до кuartилів Q1-Q2, а 1 стаття – до кuartилію Q3 за даними SCImago Journal and Country Rank). Оформлення дисертації відповідає вимогам МОН, текст написаний достатньо ясно фаховими українською та англійською мовами. Основна частина включає Вступ, три розділи, та Висновки. Розділи дисертації поділено на підрозділи, якими є статті, опубліковані за темою дисертаційного дослідження. Загальний обсяг тексту

складає 243 сторінки.

У **Вступі** наведено обґрунтування актуальності теми дослідження, сформульовано мету і завдання, описано об'єкт і предмет дослідження, а також застосовані в ході дослідження методи. Здобувач також зазначає, в чому полягає наукова новизна і практичне значення отриманих результатів, виділяє свій особистий внесок до робіт, виконаних зі співавторами. Вказано, що дослідження виконувались у відділі фізики високих густин енергії Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України в рамках трьох відомчих та семи конкурсних і цільових тем.

У **першому розділі** викладено результати досліджень, проведених на основі симуляцій в моделі іНKM зіткнень ядер свинцю на Великому адронному колайдері за енергії 5.02 TeV на нуклонну пару. Моделювання виконувалось з використанням двох різних рівнянь стану для кварк-глюонної фази з відповідними температурами партиклізації. Проаналізовано вплив адронної стадії еволюції системи на кінцеві спостережувані, а також залежність результатів обчислень від окремих параметрів моделі. Розраховані виходи частинок, їх відношення, спектри поперечного імпульсу, коефіцієнти імпульсної анізотропії було порівняно з експериментальними даними колаборації ALICE. Представлено передбачення моделі для фемтоскопічних масштабів, які характеризують розміри областей однорідності системи, для піонів та каонів. Проведено порівняння результатів моделювання для енергії 5.02 TeV з відповідними результатами для менших енергій зіткнення. Проведено аналіз залежності фемтоскопічних радіусів надм'яких піонів від поперечної маси пари частинок (при значеннях поперечної маси менших за 200 MeV/c).

У **другому розділі** здобувач аналізує проблему вибору між двома підходами до опису еволюції системи в ході зіткнення – миттєвий «фріз-аут» (заморожування) хімічного складу та імпульсних спектрів практично одразу після партиклізації, або поступовий «фріз-аут», що передбачає тривалу постгідродинамічну стадію, впродовж якої утворена система адронів ще

деякий час еволюціонує як єдине ціле, а між частинками відбуваються інтенсивні пружні і непружні взаємодії. Досліджується вплив адрон-адронних взаємодій на цій фінальній стадії зіткнення на можливість ідентифікації короткоживучих резонансів $K^*(892)$ і довгоживучих $\phi(1020)$. Дисертант також отримує оцінки для ефективних часів випромінювання піонів і каонів, а також робить оцінки тривалості гідродинамічної стадії і загального часу життя системи для зіткнень при різних релятивістських енергіях.

У **третьому розділі** В. М. Шаповал приділяє увагу проблемі кореляційного аналізу фундаментальних взаємодій між баріонами, народженими у зіткненні. Він розглядає проблему, що виникла в експериментальній роботі колаборації STAR при визначенні розмірів джерела емісії пар протон – (анти)лямбда-гіперон у зіткненнях ядер золота на колайдері RHIC за енергії 200 Гев на нуклонну пару. Ефективні радіуси джерел випромінювання баріон-баріонних та баріон-антибаріонних пар, визначені при фітуванні вимірюваних в експерименті кореляційних функцій, з незрозумілих причин відрізняються майже вдвічі. Це ставить під сумнів і отриманий у роботі STAR результат для довжини розсіяння сильної взаємодії між протоном та антилямбда-гіпероном.

Здобувачем запропоновано вдосконалену аналітичну модель для фітування кореляційної функції, яка додатково враховує ефект залишкових кореляцій та результати гідрокінетичної моделі для радіусу джерела емісії та чистоти пар. В рамках цієї моделі вдалося вирішити згадану проблему інтерпретації даних STAR та знайти оцінки дійсної та уявної частини довжини розсіяння протон-антилямбда. Одержані результати було використано для моделювання кореляційних функцій у зіткненнях на Великому адронному колайдері.

Найцікавішими новими і оригінальними результатами, отриманими у дисертації, є наступні:

1. Інтегровану гідрокінетичну модель було вперше відкалібровано для

опису зіткнень ядер свинцю на Великому адронному колайдері при енергії 5.02 TeV на нуклонну пару. При знайдених значеннях модельних параметрів здобувачеві вдалося одночасно описати широкий клас м'яких адронних спостережуваних та зробити передбачення для фемтоскопічних масштабів піонів та каонів.

2. Вперше проведено порівняння результатів моделювання у iHKM при двох рівняннях стану кварк-глюонної плазми на гідродинамічному етапі еволюції системи. Здобувач з'ясував, що обидва розглянуті рівняння стану (кожне з яких передбачає власну температуру адронізації матерії) дозволяють отримати однаково хороший опис експериментальних даних за умови відповідного перенормування початкової густини енергії у центрі системи при переході до іншого рівняння стану. Важливу роль відіграє адронна стадія зіткнення, імплементація якої в моделі дозволяє компенсувати різницю у значеннях спостережуваних, що може мати місце в кінці гідродинамічної стадії при використанні різних рівнянь стану КГП.

3. На основі розрахунків у iHKM передбачено, що фемтоскопічні радіуси піонів і каонів у зіткненнях при енергії 5.02 TeV мають бути близькими до відповідних значень при енергії 2.76 TeV, незважаючи на більшу множинність частинок та розміри системи у випадку більшої енергії зіткнення. Ефект збільшення загальних розмірів системи частково компенсується зростанням її неоднорідності внаслідок збільшення градієнтів колективної швидкості.

4. Виявлено відхилення поведінки піонних фемтоскопічних радіусів в області найменших поперечних імпульсів від степеневого закону, характерного для середніх значень імпульсу. Незвичайний характер імпульсної залежності радіусів для надм'яких піонів може свідчити про триваліше їх утримання в центрі системи з утворенням своєрідної «пастки» для таких частинок.

5. У моделі НКМ з'ясовано, що на постгідродинамічній стадії зіткнення має місце інтенсивна взаємодія короткоживучих резонансів $K^*(892)$ та

продуктів їх розпаду з густим адронним середовищем. Це призводить до видимого зменшення виходів K^* на 20% у випадку центральних зіткнень. Ефект зменшується при переході до периферичних зіткнень. Натомість, на ідентифікацію довгоживучих резонансів $\phi(1020)$ перерозсіювання на адронній стадії впливають слабо, так що їх виходи майже не залежать від центральності зіткнення.

Отримані результати говорять про те, що система адронів, утворена при адронізації згустку КГП, продовжує еволюціонувати як єдине ціле ще впродовж 5–10 фм/с. Це свідчить на користь підходу *поступового заморожування* («фріз-ауту») хімічного складу та імпульсних спектрів при описі еволюції системи, утвореної в релятивістському зіткненні ядер.

6. Здобувачем знайдено оцінки на часи випромінювання піонів і каонів у зіткненнях важких ядер при різних енергіях колайдерів RHIC та LHC. Те, що отримане значення часу емісії для каонів є більшим, ніж для піонів, свідчить про сильний вплив на каонні спостережувані взаємодії між адронами на пізньому етапі зіткнення, зокрема перерозсіювання та рекомбінація продуктів розпаду резонансів $K^*(892)$, які слугують джерелом помітної кількості вторинних каонів.

7. В моделі iHKM встановлено, що тривалість гідродинамічної стадії у зіткненнях ядер при різних ультрарелятивістських енергіях практично однакова і становить 8–10 фм/с. Близькість вказаних часів, що має місце незважаючи на різницю в енергії зіткнення, пояснюється інтенсивним тривимірним розширенням системи та схожими співвідношеннями між її розмірами та швидкістю звуку на гідродинамічному етапі еволюції при всіх розглянутих енергіях.

8. Запропоновано новий метод оцінки загального часу життя системи, яка утворюється в релятивістському зіткненні ядер, заснований на фітуванні імпульсних спектрів та фемтоскопічних радіусів піонів і каонів у діапазоні малих поперечних імпульсів. Для зіткнень ядер свинцю на колайдері LHC час життя становить близько 17 фм/с.

9. Запропоновано вдосконалення аналітичної моделі для опису баріон-антибаріонних кореляцій, що враховує ефект залишкових кореляцій. Вирішено проблему видимої двократної відмінності між радіусами джерел випромінювання пар протон-лямбда та протон-антилямбда в експериментальній роботі колаборації STAR. Визначено довжину розсіяння сильної взаємодії в парах протон-антилямбда. На основі одержаних результатів побудовано передбачення для кореляційних функцій у випадку зіткнень на Великому адронному колайдері при наявності одночасно сильної та електромагнітної взаємодії між баріонами.

Результати дисертаційного дослідження **добре обґрунтовані**. Їх **достовірність** забезпечується використанням надійної і апробованої моделі iHKM та аналізом процесу еволюції системи з різних боків і на основі різних спостережуваних. Дисертантом вирішено низку важливих та актуальних задач сучасної фізики високих густин енергії, пов'язаних з теоретичним описом ультрарелятивістських зіткнень важких іонів. Отримані результати можуть бути використані в подальших дослідженнях, присвячених експериментальному та теоретичному аналізу властивостей сильновзаємодійної матерії, яка народжується у подібних процесах.

Разом з тим, я маю **кілька зауважень і побажань** стосовно дисертації:

1. На Рис. 6 підрозділу 1.3 наводяться залежності фемтоскопічних радіусів від поперечної маси, розраховані у моделях iHKM та LQTH, та відповідні фітуючі криві. В області не надто малих імпульсів фітуюча функція є степеневою вигляду am_T^{-b} . Проте значення параметрів a і b , які, судячи з графіків є різними для різних класів центральності, в явному вигляді не наведені.

2. У підрозділі 3.1, де мова йде про визначення дійсної та уявної частини довжини розсіяння протон-антилямбда з фіту до кореляційної функції, добре було б навести обговорення фізичної інтерпретації отриманих значень (описати характер взаємодії між протоном та антилямбда-гіпероном, порівняти її з протон-протонною взаємодією тощо).

3. При обговоренні у дисертаційній роботі ефектів негаусової форми кореляційної функції (наприклад, підрозділи 1.3, 2.2, 2.5) було б доречно навести графіки проєкцій кореляційних функцій, розрахованих у моделі, разом з гаусовими фітуючими кривими.

Але перелічені зауваження не ставлять під сумнів значимість основних результатів, отриманих у дисертації, і обґрунтованість зроблених висновків, а отже не впливають і на загальну позитивну оцінку роботи.

Дисертація В. М. Шаповала є завершеною, цілісною науковою працею. Усі представлені до захисту результати отримані автором особисто. Вони повною мірою відображені у 14 наукових статтях здобувача, опублікованих у високореєтингових міжнародних журналах, таких як *Physical Review C*, *Nuclear Physics A*, *European Physical Journal A*, *Universe* тощо.

Результати дисертаційного дослідження пройшли апробацію на всеукраїнських та міжнародних наукових конференціях, таких як Workshop on Particle Correlations and Femtoscopy (2017–2019, 2023, 2024), GDRE Workshop “Heavy Ions at Relativistic Energies” (Nantes, France, 2015, 2017–2019), Young Scientists Conference “Problems of Theoretical Physics”, (Kyiv, Ukraine, 2016, 2020, 2021), All-Ukrainian scientific conference “Principal Problems of Quantum Field Theory and Gravitation” dedicated to the jubilee of M. Korkina and V. Vanyashin (Dnipro, Ukraine, 2016), “Nuclear, Particle physics and Cosmology” Workshop (Ferry Oslo–Copenhagen–Oslo, 2017), II NICA Days 2017 Conference, (Warsaw, Poland, 2017), XXIX щорічна наукова конференція ІЯД НАН України (Київ, Україна, 2022).

Дисертація відповідає паспорту спеціальності 01.04.02 – теоретична фізика. Реферат вірно відображає зміст та основні результати дисертації.

Враховуючи актуальність теми, обсяг проведених досліджень, наукову цінність та новизну одержаних результатів, я вважаю, 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.

Доцент кафедри
квантової теорії поля та
космомікрофізики фізичного факультету
Київського національного університету
імені Тараса Шевченка
доктор фізико-математичних наук, доцент

Володимир ГОРКАВЕНКО

28.08.2025р.

*Підпис Горкавенко В.
проф. І кат. Фізичний*

