

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертацію **Шаповала Володимира Миколайовича**
“Моделювання еволюції сильновзаємодійної матерії у високоенергетичних
зіткненнях важких ядер”,

подану на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук
за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика

Дисертацію В. М. Шаповала “Моделювання еволюції сильновзаємодійної матерії у високоенергетичних зіткненнях важких ядер” присвячено дослідженню нових видів матерії, що утворюються в зіткненнях ядер на сучасних прискорювачах частинок, таких як Великий адронний колайдер (LHC), CERN та Релятивістський колайдер важких іонів (RHIC), Brookhaven, USA за ультрарелятивістських енергій. Такі дослідження знаходяться на передньому краї сучасної фізики високих енергій і є **актуальними**. Найбільший інтерес у вказаному контексті викликає кварк-глюонна плазма (КГП) – стан речовини, в якому завдяки надвисокій температурі та густині енергії відбувається деконфайнмент кольору (тобто звільнення) кварків і глюонів, що відповідають за сильну взаємодію, і які за звичайних умов перебувають у зв’язаних станах всередині адронів. КГП утворюється лише на одному з проміжних етапів стрімкого, вибухоподібного процесу розширення системи, яка формується в результаті зіткнення ядер. Тому для дослідження властивостей КГП аналізуються різноманітні адронні спостережувані, такі як виходи частинок різних сортів, імпульсні спектри, кореляційні функції тощо. Вони конструюються на основі характеристик великої кількості адронів, на які розпадається утворений згусток матерії. При цьому для надійної інтерпретації даних вимірювань незамінними є теоретичні моделі процесу зіткнення. Складність формалізму квантової хромодинаміки (КХД) та динамічний, нерівноважний характер указаних процесів практично унеможливлюють на даному етапі їх опис виходячи з перших принципів. Натомість дослідники вдаються до феноменологічних підходів. Сучасні реалістичні моделі зіткнень представляють собою комп’ютерні генератори подій, які складаються з декількох модулів, кожен з яких моделює певний етап еволюції утвореної системи.

Дисертаційне дослідження В. М. Шаповала виконане в рамках такого підходу – на основі обчислень у *інтегрованій гідрокінетичній моделі* (ІНКМ). Порівняння результатів моделювання з експериментом дозволяє прослідкувати роль різних факторів у формуванні кінцевих адронних спостережуваних і, таким чином, зробити певні висновки про властивості сильновзаємодіючої матерії та характер її еволюції на проміжних стадіях зіткнення ядер.

Наукова новизна отриманих в дисертації результатів не викликає сумнівів. Інтегровану гідрокінетичну модель було вперше відкалібровано для опису зіткнень ядер свинцю на LHC за енергії 5,02 TeV на нуклонну пару з використанням двох варіантів рівняння стану кварк-глюонної матерії на гідродинамічній стадії. Порівняння обчислених у моделі «м'яких» адронних спостережуваних з експериментальними даними дозволило автору зробити висновок про важливість врахування взаємодій між частинками на адронній (тобто пост-гідродинамічній) стадії зіткнення для узгодження теоретичного опису з експериментом. Проте надати однозначну перевагу одному з двох розглянутих рівнянь стану КГП, визначивши тим самим характерні для системи швидкість звуку, температуру так званої партіклізації та початкову густину енергії, наявні експериментальні дані не дозволяють, оскільки в обох випадках модель дає близькі результати, які узгоджуються з даними вимірювань. Це вказує на компенсаторну роль адронної стадії, яка “вирівнює” кінцеві значення спостережуваних, попри те, що наприкінці гідродинамічної стадії вони можуть дещо відрізнитись в залежності від використаного рівняння стану.

Здобувачем також досліджено вплив адрон-адронних взаємодій на пізній стадії зіткнення на можливість детектування векторних резонансів $K^*(892)$ і $\phi(1020)$ за продуктами їх розпаду (пари каон - піон, та каон - антикаон, відповідно). В той час, як в експерименті можна бачити лише кінцеве число пар адронів з відповідною інваріантною масою, які асоціюють з розпадами відповідних резонансів, в рамках iНKM для кожної події зіткнення відоме початкове число резонансів кожного сорту, а також можна простежити, як змінюється кількість резонансів з часом. В результаті проведеного аналізу дисертантом було з'ясовано, що у центральних зіткненнях ядер (з малим прицільним параметром) інтенсивні адрон-адронні взаємодії тривають протягом 5–10 фм/с після завершення гідродинамічного етапу еволюції утвореної системи. Про це свідчить зміна з часом кількості короткоживучих резонансів $K^*(892)$ (їх час життя дорівнює 4–5 фм/с), що можуть бути ідентифіковані за парами дочірніх частинок, внаслідок розсіювання та рекомбінації цих пар. Кінцеве видиме число $K^*(892)$ у найбільш центральних зіткненнях на 20% менше від початкового. При переході до периферичних зіткнень, де взаємодії між утвореними адронами менш інтенсивні, частка “втрачених” резонансів поступово зменшується практично до нуля. Для довгоживучих $\phi(1020)$ резонансів (з часом життя порядку 50 фм/с), частка ідентифікованих резонансів практично не залежить від центральності. Це говорить про те, що за таких великих часів, система адронів уже є досить розрідженою, так що взаємодії між ними не впливають на можливість ідентифікації резонансів на зразок $\phi(1020)$.

На основі фітування спектрів та фемтоскопічних масштабів (величин, пов'язаних з довжинами однорідності) піонів і каонів, здобувач отримав оцінки на ефективні часи випромінювання цих частинок при різних енергіях та центральностях зіткнень. Новим і цікавим результатом є те, що в усіх розглянутих випадках часи випромінювання каонів виявилися більшими, ніж часи випромінювання піонів. В рамках чисто гідродинамічного підходу мало б бути навпаки, оскільки каони більш масивні, і джерела їх емісії повинні "відтіснятися" колективним потоком далі від центру системи, який адронізується пізніше за периферію. Те, що саме каони випромінюються пізніше, вказує на сильний вплив адронної стадії еволюції на виходи цих частинок. Зокрема, досліджені дисертантом ефекти розсіювання та рекомбінації продуктів розпаду резонансу $K^*(892)$ можуть призводити до ефективно більш пізнього вивільнення каонів з системи.

Ще одним цікавим результатом здобувача є оцінка тривалості гідродинамічної стадії у зіткненнях за різних високих енергій та аналіз можливих причин близькості отриманих часів у випадках RHIC і LHC.

У своїй дисертації В. М. Шаповал також запропонував новий метод для оцінки загального часу життя системи, утвореної у зіткненні ядер за високої енергії. Метод базується на одночасному фітуванні спектрів поперечного імпульсу та залежності поздовжніх фемтоскопічних радіусів від імпульсу пари частинок в області малих значень цих імпульсів. Отримане значення цього часу (близько 17 фм/с) знову ж таки передбачає наявність довгої адронної стадії після завершення гідродинамічного розширення системи.

Перелічені результати є важливими з огляду на відому у літературі проблему вибору між поступовим та миттєвим заморожуванням хімічного складу та імпульсних спектрів системи при описі її еволюції. Усі одержані в дисертації результати говорять на користь підходу поступового заморожування (так званий freeze-out) спектрів в ході тривалої пост-гідродинамічної стадії зіткнення.

Окремим напрямком досліджень в рамках дисертації є кореляційний аналіз сильної взаємодії між баріонами у кінцевому стані. Фітування баріон-баріонних кореляційних функцій у релятивістських ядро-ядерних зіткненнях дозволяє, разом з ефективними розмірами області випромінювання відповідних пар, визначати такі характеристики сильної взаємодії між частинками, як довжина розсіювання та ефективний радіус. У дисертації на основі моделі Ледніцкі-Любошица, запропоновано вдосконалений метод фітування кореляційних функцій з урахуванням ефекту залишкових кореляцій та даних про розмір джерела емісії і «чистоту» пар баріонів, взятих з гідрокінетичної моделі. Цей метод дозволив вирішити проблему видимої двократної відмінності між радіусами джерел випромінювання пар протон – лямбда-гіперон та антипротон – лямбда-гіперон у

експериментальному аналізу зіткнень ядер золота за найвищої енергії колайдера RHIC та визначити довжину розсіювання для антибаріон-баріонних пар. На основі отриманих результатів було зроблено передбачення кореляційних функцій у зіткненнях на LHC, в тому числі для пар протон – ксі-гіперон, в яких, крім сильної, присутня також кулонівська взаємодія між частинками.

Обґрунтованість і достовірність одержаних результатів забезпечується тим, що дослідження в основному виконувались в рамках добре відомої інтегрованої гідрокінетичної моделі, яка є однією з найбільш розвинутих сучасних моделей ядроядерних зіткнень і дозволяє реалістично моделювати весь складний процес зіткнення – від формування початкового стану до фінального адронного каскаду. Раніше модель вже була застосована до аналізу зіткнень за нижчої енергії колайдера LHC (2,76 TeV на нуклонну пару), показавши добре узгодження з експериментом і дозволяючи одночасно описувати широкий клас спостережуваних в області м'якої фізики. Метод оцінки ефективних часів випромінювання адронів різного сорту було успішно застосовано у експериментальному аналізі колаборації ALICE. Висновок про більшу адекватність підходу поступового заморожування спектрів робиться на основі аналізу одразу декількох різних спостережуваних.

Теоретичне та практичне значення результатів дисертаційного дослідження полягає у наступному. Вони є помітним внеском у дослідження властивостей сильновзаємодіючої матерії, що утворюється в ультрарелятивістських зіткненнях ядер, та у поглиблення розуміння динаміки таких процесів. Результати дисертації можуть бути використані при аналізі та інтерпретації експериментальних даних, а також стимулювати нові експериментальні дослідження на сучасних прискорювачах. Визначена у дисертації довжина розсіювання антипротон – лямбда може бути використана для вдосконалення моделей адрон-адронної взаємодії та транспортних каскадних моделей.

Результати дисертації повною мірою викладені в 14 публікаціях у фахових журналах, індексованих у базі даних Scopus (13 з них відносяться до кuartилів Q1–Q2 і одна – до кuartилію Q3 за даними SCImago Journal and Country Rank). Положення дисертації мають достатній рівень апробації на семінарах та конференціях, за матеріалами доповідей на яких опубліковано ще 9 наукових праць. Дисертацію виконано у формі наукової доповіді за сукупністю статей, які є підрозділами її основної частини. Реферат вірно відображає зміст та головні результати дисертації.

Зауваження та побажання до дисертаційної роботи.

1. Важливим питанням у розділі 3 є можливість існування зв'язаних станів в системі протон - лямбда (протон - антилямбда). В колаборації STAR отримано негативне значення

довжини розсіювання $f_0 = -2.03$ фм (точніше, дійсної її частини), що згідно загальній теорії розсіювання при низьких енергіях свідчить про відсутність зв'язаного стану, а в дисертації знайдено позитивне значення, що мало б свідчити про існування протон - антилямбда зв'язаного стану. Потрібно зауважити, що в сучасних теоретичних розрахунках в кіральной теорії збурень (J. Haidenbauer et al., Eur. Phys. J. A 56 (2020) 3, 91; e-Print: 1906.11681 [nucl-th]) отримано негативні довжини розсіювання в синглетному та триплетному спінових станах p - Λ . На мій погляд, цей аспект нуклон - гіперонної взаємодії заслуговує на подальше поглиблене вивчення.

2. У дисертації наводяться результати обчислень у моделі iHKM коефіцієнтів імпульсної анізотропії v_n лише для випадку всіх заряджених частинок (Рис. 16, 17 у підрозділі 1.2). В той же час експериментальні дані демонструють різницю у значеннях v_n для частинок з різними масами та кварковим складом. Аналіз поведінки v_n для різних сортів адронів міг би надати додаткову інформацію про характер еволюції матерії в ході зіткнення. Тому корисно було б також дослідити особливості цієї поведінки для різних сортів адронів.

3. Формула (5) у підрозділі 1.3 для залежності фемтоскопічних радіусів R від поперечної швидкості пари β є феноменологічною, без ясного фізичного змісту параметрів a , b , c , які входять до цієї формули. На додачу, позначення c в цій формулі збігається з параметром центральності c (якій визначається у відсотках).

4. На рис.13 (в рефераті дисертації) представлені кореляційні функції пар p - Ξ^- і p - Ξ^+ . Позначення Ξ^+ є не дуже вдалим, оскільки це античастинка до Ξ^- , і краще використовувати позначення Ξ^+ з ризикою зверху.

5. Слушно було б навести у дисертації порівняння результатів моделі iHKM з іншими гібридними моделями ядро-ядерних зіткнень, обговорити схожості й відмінності між цими результатами. Це дозволило б глибше зрозуміти механізми формування спостережуваних у таких моделях.

6. Є зауваження термінологічного характеру. Слово «партиклізація», яке є специфічним для теоретичних моделей у фізиці важких іонів, бажано було б визначити в розділі Перелік умовних позначень. Теж саме стосується терміну «центральність». Замість англіцизму «фріз-аут» можна використати відповідне слово «заморожування». Час в фізиці частинок звичайно вимірюється в секундах, а у дисертації (і в фізиці важких іонів) – в $\text{фм}/c$, тому для полегшення читання було б корисно в Переліку умовних позначень додати, наприклад, $1 \text{ фм}/c = 3,3 \cdot 10^{-24} \text{ сек}$. Можливо, замість терміну «сильновзаємодійна матерія» можна було б використовувати термін «сильновзаємодіюча матерія», але це на розсуд автора.

Проте вказані зауваження не знижують загальної дуже високої оцінки отриманих у дисертації В. М. Шаповала результатів.

Підсумовуючи, на мій погляд дисертація В. М. Шаповала є цілісною і завершеною науковою працею, яка містить оригінальні і важливі результати з актуального напрямку сучасної фізики високих енергій, які автор отримав особисто. Вони значною мірою прояснюють картину еволюції систем, що утворюються в релятивістських ядро-ядерних зіткненнях, та роль окремих факторів у формуванні кінцевих адронних спостережуваних. Результати дисертації можуть бути використані в теоретичних і експериментальних дослідженнях в Україні та за її межами, зокрема в експериментах колаборації ALICE на Великому адронному колайдері, Релятивістського колайдера важких іонів RHIC, у Варшавському технологічному університеті, Лабораторії Субатех (м. Нант, Франція), ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України та інших.

Враховуючи актуальність обраної теми, наукову цінність, новизну та обґрунтованість отриманих результатів і рівень їх апробації, я вважаю, що дисертація В. М. Шаповала «Моделювання еволюції сильновзаємодійної матерії у високоенергетичних зіткненнях важких ядер» цілком відповідає всім 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 квантово-електродинамічних явищ і електродинаміки адронів

Інституту теоретичної фізики імені О.І. Ахієзера

ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України,

академік НАН України

доктор фізико-математичних наук



Олександр КОРЧИН

Підпис О. Ю. Корчина засвідчую:

Вчений секретар

ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України

кандидат фізико-математичних наук



Олександр ВОЛОБУЄВ

«25» 08 2025 р.