



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор Інституту теоретичної фізики

М. М. Боголюбова НАН України

Сергій ПЕРЕПЕЛИЦЯ

« 01 » травня 2025 р.

ВИСНОВОК

**Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України
про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів
дисертації Шаповала Володимира Миколайовича на тему:
«Моделювання еволюції сильновзаємодійної матерії
у високоенергетичних зіткненнях важких ядер», поданої на здобуття
наукового ступеня доктора фізико-математичних наук
за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика**

Дисертація (наукова доповідь) Шаповала Володимира Миколайовича на тему: «Моделювання еволюції сильновзаємодійної матерії у високоенергетичних зіткненнях важких ядер», подана на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика, є цілісною, завершеною науковою працею.

1. Актуальність теми дослідження.

З кінця 1970х років в науковій спільноті обговорюється можливість штучного створення в лабораторних умовах нової форми сильновзаємодійної матерії — кварк-глюонної плазми (КГП), в якій кварки і глюони не були б зв'язаними в адрони. Для пошуку сигналів утворення гарячої КГП починають експериментальні програми на прискорювачах AGS (Брукхевен, США) та SPS (ЦЕРН, Швейцарія). У 2000 році ЦЕРН вперше повідомляє про отримання КГП у зіткненнях ядер свинцю на SPS.

Наразі кварк-глюонну плазму отримують і досліджують в релятивістських зіткненнях важких ядер на таких колайдерах, як RHIC у Брукхевені та LHC у ЦЕРНі. Кварк-глюонна плазма характеризується надзвичайно високими температурою та густиною енергії. Типові розміри систем, що утворюються в результаті зіткнень, становлять величину порядку 10^{-15} м, або 1 фм (фемтометр), а типовий час життя — 10 фм/с, де c є швидкість світла. Вважається, що в стані кварк-глюонної плазми перебував увесь Всесвіт в інтервалі 10^{-10} – 10^{-5} с після Великого Вибуху, тож експерименти з ядро-ядерних зіткнень надають унікальну можливість дослідити в лабораторії умови, в яких існувала матерія в перші мікросекунди після народження нашого світу. Крім того, всередині КГП завдяки глюон-глюонній взаємодії активно утворюються дивні s -кварки, які можуть

поєднуватися із більш важкими c і b кварками, відсутніми у звичайній речовині, але народжуваними завдяки величезній кінетичній енергії у релятивістських зіткненнях ядер. Тому утворювані згустки сильновзаємодійної матерії є щедрим джерелом екзотичних частинок, що містять у собі вказані типи кварків. Це відкриває нові широкі можливості для досліджень властивостей даних частинок та взаємодій між ними. Всебічне дослідження властивостей КГП та процесів її утворення, еволюції і розпаду становлять один з найважливіших напрямків сучасної фундаментальної фізики, який бурхливо розвивається.

Кварк-глюонна плазма утворюється лише на проміжній стадії процесу зіткнення ядер і існує дуже короткий час, тож її властивості досліджують аналізуючи кінцеві спостережувані, які стосуються утворених в результаті зіткнення адронів, фотонів та лептонів. При цьому для надійної та коректної інтерпретації експериментальних даних, для ретельного аналізу динаміки процесу та механізмів формування спостережуваних незамінними стають теоретичні моделі ядро-ядерних зіткнень за високих енергій.

Оскільки за своїми властивостями КГП схожа на майже ідеальну рідину з дуже малою в'язкістю, ключовим елементом сучасних моделей ядро-ядерних зіткнень є релятивістська гідродинаміка, яка на фінальному етапі еволюції системи переходить в адронний каскад, що описує пружні і непружні взаємодії між частинками, утвореними в результаті розпаду сформованого раніше згустку.

Інтегрована гідрокінетична модель (iHKM) є однією з найбільш розвинутих сучасних моделей ядро-ядерних зіткнень, що включає п'ять окремих модулів для реалістичного опису різних стадій еволюції утвореної системи, в тому числі стадії передрівноважної динаміки, на якій відбувається термалізація та поступовий перехід від початкового нерівноважного стану до майже локально рівноважного, сумісного з подальшим гідродинамічним описом.

Дисертація присвячена вирішенню актуальних проблем фізики високих енергій в контексті дослідження властивостей систем, що утворюються в релятивістських зіткненнях важких ядер (початкові умови і рівняння стану КГП у моделі зіткнення, аналіз просторової та часової структури утворюваних систем, опис м'яких адронних спостережуваних, роль адронної стадії у їх формуванні, проблема миттєвого або поступового замороження спектрів, оцінка тривалості різних стадій зіткнення, аналіз взаємодій між баріонами у кінцевому стані тощо). Дослідження в основному проводились в рамках інтегрованої гідрокінетичної моделі ядро-ядерних зіткнень.

2. Зв'язок з науковими програмами, планами, темами, грантами.

Дисертаційна робота була виконана у відділі фізики високих густин енергії Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова Національної академії наук України в рамках відомчих державних програм:

“Дослідження сильновзаємодіючої матерії та структури адронів в релятивістських зіткненнях адронів та ядер” (2016–2017), номер державної реєстрації — 0113U001092, шифр — 1.4.1;

“Пошук нових форм сильновзаємодійної матерії в зіткненнях адронів та ядер за високих енергій” (2018–2022), номер державної реєстрації — 0118U003197, шифр — 1.4.1;

“Теорія та моделювання властивостей сильновзаємодійної матерії в релятивістських зіткненнях адронів та ядер” (2023–2024), номер державної реєстрації — 0123U100302, шифр — 1.4.1.

Дослідження також проводилися в Інституті теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України в рамках таких проєктів конкурсної та цільової тематики НАН України та ДФФД:

“Кореляційний аналіз сильної взаємодії екзотичних баріонів у релятивістських ядро-ядерних зіткненнях” (2016), конкурсний грант НАН України для молодих учених в рамках програми “Фундаментальні властивості матерії у широкому інтервалі масштабів простору і часу”, номери державної реєстрації — 0116U002745;

“Важкі іони з ультрарелятивістськими енергіями (гідрокінетичний опис)” (2016), відповідно до Угоди про співробітництво між НАН України та Національним центром наукових досліджень Франції (CNRS), номер державної реєстрації — 0116U005425;

“Кореляційний аналіз сильної взаємодії між баріонами у зіткненнях важких іонів” (2018), грант Ф75/219-2018 Президента України для підтримки наукових досліджень молодих учених у 2018 році, отриманий за конкурсом ДФФД, номер державної реєстрації — 0118U006969;

“EUREA: Європейська угода з ультрарелятивістських енергій” (2018–2019), відповідно до Угоди про співробітництво між НАН України та Національним центром наукових досліджень Франції (CNRS), номери державної реєстрації — 0118U002310, 0119U001775;

“Просторово-часова динаміка і властивості надщільної матерії в релятивістських зіткненнях ядер, та їх прояви в поточних експериментах на LHC, RHIC, і запланованих FAIR, NICA” (2020), за Цільовою програмою НАН України “Фундаментальні дослідження з фізики високих енергій та ядерної фізики (міжнародна співпраця)”, номер державної реєстрації — 0120U103135;

“Фундаментальні властивості матерії в релятивістських ядерних зіткненнях та у ранньому Всесвіті” (2020), за конкурсом НАН України “Підтримка розвитку пріоритетних напрямів наукових досліджень”, номер державної реєстрації — 0120U100935;

“Динамічні та статистичні властивості надщільної речовини, що формується в релятивістських ядро-ядерних та протон-протонних зіткненнях з високою множинністю при варіативних енергіях колайдерів RHIC та LHC” (2021, 2023), за Цільовою програмою НАН України “Участь в новітніх міжнародних проєктах з фізики високих енергій та ядерної фізики”, номери державної реєстрації — 0121U111762, 0123U101684.

3. Мета і задачі дослідження.

Метою дисертаційної роботи є теоретичне дослідження просторово-часової структури та характеру еволюції систем, що народжуються в зіткненнях важких ядер за високих енергій, з'ясування властивостей нових видів сильновзаємодійної матерії, які утворюються на проміжних стадіях зіткнення, та аналіз механізмів формування м'яких адронних спостережуваних в процесі еволюції системи.

Для досягнення вказаної мети було поставлено наступні задачі:

1. Відкалібрувати інтегровану гідрокінетичну модель (iHKM) для опису м'яких спостережуваних у зіткненнях ядер свинцю на Великому адронному колайдері (LHC) за енергії 5.02 TeV на нуклонну пару. Калібрування провести для двох рівнянь стану кварк-глюонної матерії на гідродинамічній стадії — рівняння Лейна-Шредера та рівняння колаборації HotQCD — з відповідними температурами партиклізації.

2. Розрахувати у моделі iHKM всі основні адронні спостережувані в області м'якої фізики (виходи частинок різних сортів, їх відношення, спектри поперечного імпульсу, коефіцієнти імпульсної анізотропії, кореляційні функції та відповідні фемтоскопічні масштаби). Порівняти результати обчислень при двох використаних рівняннях стану КГП з наявними експериментальними даними. Дослідити залежність результатів моделювання від параметрів моделі, зокрема від початкового профілю густини енергії. Порівняти результати моделювання для зіткнень ядер свинцю при 5.02 TeV з відповідними результатами для енергії 2.76 TeV, а також для зіткнень ядер ксенону за енергії LHC 5.44 TeV та зіткнень ядер золота на колайдері RHIC за енергії 200 GeV на нуклонну пару.

3. Дослідити у моделі iHKM вплив постгідродинамічної адронної стадії еволюції системи на результуючі відношення чисел частинок та фемтоскопічні масштаби.

4. Дослідити поведінку фемтоскопічних радіусів в області надмалих імпульсів ($m_T < 200$ MeV/c) у моделі iHKM. Порівняти отримані результати з розрахунками у моделі зі статистичною адронізацією LQTH.

5. В рамках інтегрованої гідрокінетичної моделі дослідити вплив взаємодії резонансів $K^*(892)$ і $\phi(1020)$ та продуктів їх розпаду з адронним середовищем на пізній стадії зіткнення на можливість детектування даних резонансів та їх кінцеві виходи.

6. На основі розрахованих у моделі iHKM спектрів та фемтоскопічних радіусів оцінити і порівняти значення ефективних часів емісії π - та K -мезонів. Дослідити залежність результатів від енергії та центральності зіткнення.

7. Оцінити тривалість гідродинамічної стадії еволюції системи в зіткненнях важких іонів при різних релятивістських енергіях, проаналізувати від чого вона залежить.

8. Розробити метод оцінки загального часу життя системи, утвореної у релятивістському зіткненні ядер, з урахуванням адронної стадії.

9. Вдосконалити метод кореляційного аналізу взаємодій у кінцевому стані для визначення довжини розсіяння сильної взаємодії та ефективного радіусу джерела емісії баріонів у парах $\bar{p}\Lambda$ в зіткненнях ядер золота на колайдері RHIC. На основі результатів для RHIC змодельовати відповідні кореляції у випадку енергій колайдера LHC. Розглянути також випадок одночасної наявності сильної та електромагнітної взаємодії між баріонами у парі.

4. Наукова новизна дослідження.

У дисертації отримані наступні оригінальні результати:

Інтегровану гідрокінетичну модель ядро-ядерних зіткнень (іНКМ) вперше відкалібровано для опису широкого класу спостережуваних м'якої фізики (виходи частинок різних сортів, їх відношення, спектри поперечного імпульсу, коефіцієнти імпульсної анізотропії, кореляційні функції та відповідні фемтоскопічні масштаби) у зіткненнях ядер свинцю на Великому адронному колайдері (LHC) при енергії 5.02 TeV на нуклонну пару.

Однаково гарний опис наявних експериментальних даних та передбачення для фемтоскопічних масштабів піонів і каонів вперше отримано у моделі іНКМ при двох різних рівняннях стану кварк-глюонної матерії на гідродинамічній стадії еволюції системи. Збереження узгодженості теоретичного опису з експериментом при переході до іншого рівняння стану досягається перенормуванням початкової густини енергії у центрі системи ϵ_0 . Таким чином, встановлено, що наявні результати експериментальних вимірювань м'яких адронних спостережуваних наразі не дозволяють надати чітку перевагу одному з двох розглянутих рівнянь стану та визначити точні величини температури партиклізації і густини енергії на ранній стадії зіткнення.

Встановлено, що адронна стадія зіткнення в іНКМ компенсує різницю у значеннях м'яких спостережуваних, яка може мати місце в кінці гідродинамічної стадії внаслідок використання різних рівнянь стану КГП. Цей висновок говорить на користь концепції "поступового фріз-ауту", тобто поступового формування імпульсних спектрів та виходів частинок в процесі еволюції системи, що включає в себе довгу адронну стадію. Зокрема, адронна стадія має ключове значення для успішного опису виходів резонансів $K^*(892)$ та відношень числа народжених протонів до числа пі-мезонів.

В рамках моделі іНКМ з'ясовано, що фемтоскопічні масштаби π - та K -мезонів у випадку енергії зіткнень 5.02 TeV близькі до відповідних значень при енергії 2.76 TeV. Ефект певного зростання множинності народжених частинок внаслідок збільшення енергії зіткнення частково компенсується більшими градієнтами колективної швидкості при енергії 5.02 TeV. Підтверджено порушення скейлінгу радіусів піонів і каонів за поперечною масою пари m_T і наявність скейлінгу за середнім поперечним імпульсом k_T (при не надто малих k_T), що раніше спостерігалось в рамках розрахунків у гідрокінетичній моделі.

В області надм'яких імпульсів ($m_T < 200$ MeV/c) у моделях іНКМ та LQTH виявлено відхилення поведінки фемтоскопічних піонних радіусів від степеневого закону виду am_T^{-b} . Незвичний характер залежності $R(m_T)$ для піонів з наднизькими імпульсами може свідчити про своєрідне відокремлення даних частинок від решти системи, їх триваліше утримання в її центрі та утворення своєрідної "пастки" для надм'яких піонів.

У моделі НКМ з'ясовано, що на адронній стадії зіткнення відбувається інтенсивна взаємодія короткоживучих резонансів $K^*(892)$ (час життя яких становить близько 5 фм/c) та продуктів їх розпаду з густим адронним середовищем. Для центральних зіткнень така взаємодія призводить спочатку до втрати близько 70% первинно утворених K^* , а потім до утворення шляхом рекомбінації додаткових 50% від початкової кількості K^* . В результаті спостерігається недостача числа ідентифікованих K^* у 20%. Ефект зменшується

при переході від центральних до периферичних зіткнень. Виходи ж довгоживучих резонансів $\phi(1020)$ (з часом життя порядку 50 фм/с) не залежать від центральності зіткнення.

У інтегрованій гідрокінетичній моделі отримано оцінки на часи випромінювання піонів і K -мезонів у зіткненнях важких ядер на колайдерах LHC та RHIC. Несподіваним результатом з точки зору гідродинамічних міркувань є одержане в роботі більше значення ефективного часу емісії каонів у порівнянні з піонами. Даний результат можна пояснити сильним впливом взаємодій між адронами на фінальній стадії зіткнення, зокрема перерозсіань і рекомбінації продуктів розпаду резонансів $K^*(892) \rightarrow K\pi$, на результуючі каонні спостережувані. Для більш периферичних зіткнень та при зниженні їх енергії часи емісії частинок зменшуються, разом з інтенсивністю поперечного колективного потоку та ефективною температурою спектрів.

В рамках моделі iHKM встановлено, що тривалість гідродинамічної стадії для зіткнень ядер золота при енергії 200 GeV і ядер свинцю при енергіях 2.76 TeV та 5.02 TeV на нуклонну пару майже однакова і становить 8–10 фм/с. Головними причинами близькості отриманих значень, попри різницю в енергії зіткнення, є інтенсивне, суттєво тривимірне гідродинамічне розширення системи, яке починається з певного моменту власного часу, та схожі співвідношення між розмірами системи та середньою величиною швидкості звуку на гідродинамічній стадії в усіх вказаних випадках.

Запропоновано метод оцінки загального часу життя системи, що формується у релятивістському зіткненні ядер, на основі фітування спектрів та фемтоскопічних радіусів піонів і каонів в області малих поперечних імпульсів. Для зіткнень ядер свинцю на Великому адронному колайдері отримано значення часу життя системи порядку 17 фм/с, що говорить про наявність у таких зіткненнях довгої адронної стадії, яка грає важливу роль у формуванні кінцевих спектрів та фемтоскопічних радіусів.

На основі формалізму Куніна-Пратта та Ледніцкі-Любошица, а також розрахунків у гідрокінетичній моделі запропоновано просту аналітичну модель для опису баріон-баріонних та баріон-антибаріонних кореляційних функцій з урахуванням ефекту залишкових кореляцій. В рамках запропонованого підходу вдалося вирішити проблему видимої двократної відмінності між радіусами джерел емісії пар $p\Lambda$ і $\bar{p}\Lambda$ в експериментальній роботі колаборації STAR [J. Adams et al., Phys. Rev. C **74**, 064906 (2006)] щодо зіткнень ядер золота за найвищої енергії прискорювача RHIC. Визначено довжину розсіяння сильної взаємодії у парах $\bar{p}\Lambda$. На основі отриманих результатів зроблено передбачення кореляційних функцій для зіткнень при енергії колайдера LHC з урахуванням сильної та кулонівської взаємодії між баріонами.

5. Теоретичне та практичне значення роботи.

Отримані у дисертації результати мають теоретичний характер і є внеском в дослідження властивостей сильновзаємодійної матерії, що утворюється у високоенергетичних ядро-ядерних зіткненнях, та у поглиблення розуміння динаміки даних процесів.

Результати дисертації можуть бути використані при аналізі та інтерпретації експериментальних даних, а також можуть стимулювати нові експериментальні дослідження на сучасних прискорювачах частинок, таких як LHC та RHIC.

Визначена у дисертації довжина розсіювання $\bar{p}\Lambda$ може бути використана для вдосконалення існуючих моделей адрон-адронної взаємодії та каскадних моделей.

Результати роботи також можуть слугувати підґрунтям для подальшого розвитку теоретичного опису еволюції матерії в ході зіткнень важких іонів.

6. Особистий внесок здобувача.

Дисертація (наукова доповідь) є самостійною науковою працею, в якій висвітлені власні ідеї і розробки автора, що дозволили вирішити поставлені завдання. Робота містить теоретичні та методичні положення і висновки, сформульовані дисертантом особисто.

У публікаціях за темою дисертації, виконаних зі співавторами, здобувачеві належить:

- постановка задачі, ідея вдосконалення методу кореляційного аналізу за рахунок обчислення функції джерела у гідрокінетичній моделі та ефективного врахування залишкових кореляцій, розрахунки функцій джерела у гідрокінетичній моделі, фітування експериментальних кореляційних функцій [1];

- постановка задачі, оцінка невизначеностей у передбачених кореляційних функціях через невизначеності у значеннях окремих параметрів, оцінка чистоти пар на основі розрахунків у гідрокінетичній моделі, розрахунок баріон-баріонної кореляційної функції, підготовка тексту та рисунків для рукопису статті [2];

- пояснення одержаного більш пізнього часу емісії K -мезонів порівняно з π -мезонами; аналіз залежності отримуваної величини фемтоскопічних радіусів від діапазону відносного імпульсу, в якому проводиться фітування кореляційної функції; підготовка тексту та рисунків для рукопису статті [3];

- розрахунок функцій джерела та чистоти пар у гідрокінетичній моделі, розрахунок кореляційних функцій $p\Xi^-$ з урахуванням кулонівської взаємодії [4];

- розрахунки у гідрокінетичній моделі виходів резонансів K^* і ϕ та їх відношень до виходів каонів, розрахунок відповідних спектрів поперечного імпульсу; розрахунок функцій емісії K^* та ϕ і чисел резонансів, що можуть бути детектовані за інваріантною масою продуктів їх розпаду на різних стадіях зіткнення; аналіз впливу адронної стадії на виходи резонансів та інтерпретація результатів [5];

- розрахунок відношень чисел частинок у гідрокінетичній моделі, аналіз результатів, пояснення відмінностей між результатами обчислень у моделі з вимкненою адронною стадією та у термальній моделі для відношень K^*/K^{ch} [6];

- постановка задачі, перевірка коректності комп'ютерних розрахунків, підготовка тексту та рисунків для рукопису статті [7];

- калібрування інтегрованої гідрокінетичної моделі при двох різних рівняннях стану для КГП з відповідними температурами партиклізації, розрахунки у моделі виходів частинок, їх відношень, імпульсних спектрів, v_n -коефіцієнтів, кореляційних функцій; порівняння швидкості звуку та швидкості поперечного

колективного потоку для двох рівнянь стану КГП; аналіз ролі адронної стадії еволюції системи у формуванні спостережуваних; підготовка тексту та рисунків для рукопису статті [8];

— перевірка коректності комп'ютерних розрахунків, участь в аналізі результатів, підготовка тексту та рисунків для рукопису статті [9];

— аналіз залежності параметра α , що регулює частки внесків моделей бінарних зіткнень та пораних нуклонів до початкового поперечного профілю густини енергії, від енергії зіткнення та геометрії ядер, що зіштовхуються; перевірка коректності комп'ютерних розрахунків м'яких спостережуваних, підготовка тексту та рисунків для рукопису статті [10];

— постановка задачі, перевірка розрахунків фемтоскопічних масштабів, аналіз та інтерпретація результатів, підготовка тексту та рисунків для рукопису статті [11];

— постановка задачі, обчислення імпульсних спектрів, фемтоскопічних масштабів та функцій емісії у інтегрованій гідрокінетичній моделі, визначення часів емісії піонів та каонів для зіткнень різної центральності, аналіз та інтерпретація результатів, підготовка тексту та рисунків для рукопису статті [12];

— ідея методу оцінки повного часу життя системи, оцінка тривалості гідродинамічної стадії зіткнення та аналіз причин близькості її значень для різних типів ультрарелятивістських зіткнень; розрахунки у інтегрованій гідрокінетичній моделі функцій джерела, розподілів часів випромінювання частинок, еволюції густини енергії з часом; підготовка тексту та рисунків для рукопису статті [13];

— розрахунки фемтоскопічних радіусів у інтегрованій гідрокінетичній моделі, участь в аналізі та інтерпретації результатів, наочна демонстрація утримання надм'яких піонів у центрі системи та більшої тривалості їх випромінювання за допомогою розрахунку відповідних функцій емісії [14].

7. Апробація результатів дослідження.

Усі результати, висвітлені у дисертації, були представлені на наукових зібраннях в Інституті теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова Національної академії наук України, а також доповідалися та обговорювалися на міжнародних та всеукраїнських конференціях:

— XVII GDRE Workshop “Heavy Ions at Relativistic Energies”, 28 June – 4 July 2015, Nantes, France

— VII Young Scientists Conference “Problems of Theoretical Physics”, dedicated to 50-th anniversary of Bogolyubov Institute for Theoretical Physics, December 13–15, 2016, Kyiv, Ukraine

— All-Ukrainian scientific conference “Principal Problems of Quantum Field Theory and Gravitation” dedicated to the jubilee of M. Korkina and V. Vanyashin, 4 November 2016, Dnipro, Ukraine

— XIX GDRE Workshop “Heavy Ions at Relativistic Energies”, 3–7 July 2017, Nantes, France

— XII Workshop on Particle Correlations and Femtoscopy, 12–16 June 2017, Amsterdam, Netherlands

— Nuclear, Particle physics and Cosmology Workshop, Ferry Oslo–Copenhagen–Oslo, 16–18 May 2017

— II NICA Days 2017 Conference associated with the II Slow Control Warsaw 2017, Warsaw, Poland, 6–10 November 2017

— XX GDRE Workshop “Heavy Ions at Relativistic Energies”, 8–14 July 2018, Nantes, France

— XIII Workshop on Particle Correlations and Femtoscopy, Krakow, Poland, 22–26 May 2018

— GDRI 2019 International Research Network Meeting, 14–20 July 2019, Nantes, France

— XIV Workshop on Particle Correlations and Femtoscopy, 3–7 June 2019, Dubna

— II International Workshop on Theory of Hadronic Matter Under Extreme Conditions, 16–19 September 2019, Dubna

— XI conference of young scientists “Problems of theoretical physics”, 21–23 December 2020, Kyiv, Ukraine

— XII Young Scientists Conference “Problems of Theoretical Physics”, Kyiv, 21–22 December, 2021

— XXIX щорічна наукова конференція ІЯД НАН України, Київ, 26–30 вересня 2022

— EMMI Rapid Reaction Task Force (RRTF) “Direct-Photon Puzzle”, 24–27 July 2023, Heidelberg, Germany

— XVI Workshop on Particle Correlations and Femtoscopy, 6–10 November 2023, Catania, Italy

— XVII Workshop on Particle Correlations and Femtoscopy, 4–8 November 2024, Toulouse, France

8. Публікації. За результатами дослідження опубліковано 23 наукових праці: 14 статей у закордонних фахових виданнях (індексованих у базі Scopus), в яких представлено основні наукові результати — з них 13 відносяться до квартилів Q1–Q2 і 1 стаття відноситься до квартилю Q3 за даними Scimago Journal and Country Rank, — а також 9 публікацій, що засвідчують апробацію та додатково відображають наукові результати дисертації.

Список опублікованих праць за темою дисертації

Публікації, де представлено основні наукові результати:

1. **V. M. Shapoval**, B. Erasmus, R. Lednicky, and Yu. M. Sinyukov, *Extracting $p\Lambda$ scattering lengths from heavy ion collisions*, Phys. Rev. C **92**(3), 034910 (7 pages) (2015).

<https://doi.org/10.1103/PhysRevC.92.034910> (*Scopus, Q1*)

2. **V. M. Shapoval**, Yu. M. Sinyukov, V. Yu. Naboka, *Proton- Λ correlation functions at energies available at the CERN Large Hadron Collider taking into account residual correlations*, Phys. Rev. C **92**(4), 044910 (5 pages) (2015).

<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.92.044910> (*Scopus, Q1*)

3. Yu. M. Sinyukov, **V. M. Shapoval**, V. Yu. Naboka, *On m_T dependence of femtoscopy scales for meson and baryon pairs*, Nucl. Phys. A **946**, pp. 227–239 (2016).

<https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2015.11.014> (*Scopus*, Q2)

4. Yu. M. Sinyukov, **V. M. Shapoval**, *Production and correlations of strange mesons and baryons at RHIC and LHC in hydrokinetic model*, Acta Phys. Pol. B **47**(7), pp. 1883–1908 (2016).

<https://doi.org/10.5506/APhysPolB.47.1883> (*Scopus*, Q2)

5. **V. M. Shapoval**, P. Braun-Munzinger, Yu. M. Sinyukov, *$K^*(892)$ and $\phi(1020)$ production and their decay into the hadronic medium at the Large Hadron Collider*, Nucl. Phys. A **968**, p. 391–402 (2017).

<https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2017.09.002> (*Scopus*, Q2)

6. Yu. M. Sinyukov, **V. M. Shapoval**, *Particle production at energies available at the CERN Large Hadron Collider within an evolutionary model*, Phys. Rev. C **97**(6), 064901 (5 pages) (2018).

<https://doi.org/10.1103/PhysRevC.97.064901> (*Scopus*, Q1)

7. Yu. M. Sinyukov, M. D. Adzhymambetov, V. Yu. Naboka, **V. M. Shapoval**, *The prethermal stage of heavy-ion collision and the particle production*, Acta Phys. Pol. B Proceedings Supplement **11**(4), pp. 633–636 (2018).

<https://doi.org/10.5506/APhysPolBSupp.11.633> (*Scopus*, Q3)

8. **V. M. Shapoval**, Yu. M. Sinyukov, *Bulk observables in Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV at the CERN Large Hadron Collider within the integrated hydrokinetic model*, Phys. Rev. C **100**(4), 044905 (11 pages) (2019).

<https://doi.org/10.1103/PhysRevC.100.044905> (*Scopus*, Q1)

9. M. D. Adzhymambetov, **V. M. Shapoval**, Yu. M. Sinyukov, *Description of bulk observables in Au+Au collisions at top RHIC energy in the integrated hydrokinetic model*, Nucl. Phys. A **987**, pp. 321–336 (2019).

<https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2019.04.013> (*Scopus*, Q2)

10. **V. M. Shapoval**, M. D. Adzhymambetov, and Yu. M. Sinyukov, *Femtoscopy scales and particle production in the relativistic heavy ion collisions from Au+Au at 200 AGeV to Xe+Xe at 5.44 ATeV within the integrated hydrokinetic model*, Eur. Phys. J. A **56** 260 (19 pages) (2020).

<https://doi.org/10.1140/epja/s10050-020-00266-x> (*Scopus*, Q1)

11. Yu. M. Sinyukov, M. D. Adzhymambetov, and **V. M. Shapoval**, *Correlation analysis of high-energy heavy-ion collisions within the integrated hydrokinetic model*, Eur. Phys. J. Spec. Top. **229**, pp. 3551–3557 (2020).

<https://doi.org/10.1140/epjst/e2020-000043-2> (*Scopus*, Q2)

12. **V. M. Shapoval**, Yu. M. Sinyukov, *Kaon and pion maximal emission times extraction from the femtoscopy analysis of 5.02A TeV LHC collisions within the integrated hydrokinetic model*, Nucl. Phys. A **1016**, 122322 (12 pages) (2021).

<https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2021.122322> (*Scopus*, *Q2*)

13. Yuri Sinyukov, **Volodymyr Shapoval** and Musfer Adzhymambetov, *Space–Time Structure of Particle Emission and Femtoscopy Scales in Ultrarelativistic Heavy-Ion Collisions*, Universe **9**, 433 (17 pages) (2023).

<https://doi.org/10.3390/universe9100433> (*Scopus*, *Q1*)

14. W. Rzesza, G. Kornakov, A. R. Kisiel, Yu. M. Sinyukov, and **V. M. Shapoval**, *Femtoscopy analysis of ultrasoft pion trap at energies available at the CERN Large Hadron Collider*, Phys. Rev. C **110**, 034904 (10 pages) (2024).

<https://doi.org/10.1103/PhysRevC.110.034904> (*Scopus*, *Q1*)

*Наукові праці, які засвідчують апробацію
та додатково відображають наукові результати дисертації:*

15. Yu. M. Sinyukov, **V. M. Shapoval**, V. Yu. Naboka, *The K^* and ϕ resonances observability at the top Relativistic Heavy Ion Collider energy*, Visnik Dnipropetrovs'kogo universitetu. Seria Fizika, radioelektronika. — 2016. — Vol. 24. — Issue 23(2). — pp. 19–24.

16. **V. M. Shapoval**, P. Braun-Munzinger, Yu. M. Sinyukov, *$K^*(892)$ and $\phi(1020)$ resonances as the probes of hadronic medium in heavy ion collisions*. VII Young Scientists Conference “Problems of Theoretical Physics”, dedicated to 50-th anniversary of Bogolyubov Institute for Theoretical Physics, December 13–15, 2016, Kyiv, Ukraine, Program and Abstracts. — Kyiv. — 2016. — O.29.

17. Yu. M. Sinyukov, M. D. Adzhymambetov, V. Yu. Naboka, **V. M. Shapoval**, *The femtoscopy scales in Au+Au collisions at the top RHIC energy*, Acta Phys. Pol. B Proceedings Supplement **12**(2), pp. 235–240 (2019).

<https://doi.org/10.5506/APhysPolBSupp.12.235>

18. Yu. Sinyukov, M. Adzhymambetov, **V. Shapoval**, *Particle Production in Xe+Xe Collisions at the LHC within the Integrated Hydrokinetic Model*, Particles **3**, pp. 114–122 (2020). <http://dx.doi.org/10.3390/particles3010010>

19. Yu. M. Sinyukov, M. D. Adzhymambetov, **V. M. Shapoval**, V. Yu. Naboka, *Femtoscopic Structure of Relativistic Heavy Ion Collisions in the Integrated HydroKinetic Model*, Physics of Particles and Nuclei **51**(3), pp. 258–262 (2020).

<https://doi.org/10.1134/S1063779620030260>

20. M. Adzhymambetov, Yu. Sinyukov, **V. Shapoval**, *Femtoscopic analysis of relativistic heavy-ion collisions in the hydrokinetic approach*, XI conference of young scientists “Problems of theoretical physics”, 21–23 December 2020, Kyiv, Ukraine, Book of Abstracts, p. 6.

21. V. M. Shapoval, Yu. M. Sinyukov, *The estimation of pion and kaon maximal emission times in 5.02A TeV collisions at the LHC*, XII Young Scientists Conference "Problems of Theoretical Physics", Kyiv, 21–22 December, 2021, Book of Abstracts. — Kyiv. — 2021. — O.21.

22. Yu. M. Sinyukov, V. M. Shapoval, M. D. Adzhymambetov, *Space-time picture and observables in heavy ion collisions at the Large Hadron Collider energies*, XXIX Annual Scientific Conference of the Institute for Nuclear Research of the NAS of Ukraine, Kyiv, September 26–30, 2022, Nucl. Phys. At. Energy **24**, pp. 087–092 (2023). <https://doi.org/10.15407/jnpae2023.02.087>

23. Yu. M. Sinyukov, V. M. Shapoval, M. D. Adzhymambetov, *Hidden puzzle of the correlation femtoscopy at the top RHIC and LHC energies and its possible solution*, Il Nuovo Cimento **48 C** 14 (5 pages) (2025).

<https://doi.org/10.1393/ncc/i2025-25014-5>

9. Оцінка мови та стилю дисертації. Дисертація (наукова доповідь) виконана фаховою українською мовою, текстове подання матеріалу відповідає стилю науково-дослідної літератури.

10. Відповідність принципам академічної доброчесності.

Дисертаційна робота «Моделювання еволюції сильновзаємодійної матерії у високоенергетичних зіткненнях важких ядер» відповідає принципам академічної доброчесності. Використані в докторській дисертації та наукових публікаціях, де висвітлено основні наукові результати дисертації, наукові тексти, ідеї, розробки, наукові результати й матеріали інших авторів супроводжуються посиланням на авторів та/або на джерело опублікування.

11. Відповідність змісту дисертації спеціальності, з якої вона подається до захисту. Дисертаційне дослідження на тему «Моделювання еволюції сильновзаємодійної матерії у високоенергетичних зіткненнях важких ядер» відповідає паспорту спеціальності 01.04.02 – теоретична фізика.

ВИСНОВОК

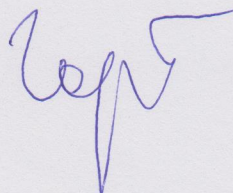
Дисертація (наукова доповідь) на тему «Моделювання еволюції сильновзаємодійної матерії у високоенергетичних зіткненнях важких ядер», виконана Шаповалом Володимиром Миколайовичем, є завершеною науково-дослідною роботою. Отримані результати є новими та оригінальними, мають теоретичну і практичну цінність, отримали необхідну апробацію на наукових конференціях і семінарах. Структура й обсяг роботи відповідають встановленим вимогам. Зміст дисертації (наукової доповіді) відповідає визначеній меті, поставлені здобувачем наукові завдання вирішені повністю, мети дослідження досягнуто. Використані методи і підходи повністю обґрунтовані та аргументовані. У публікаціях здобувача відображені всі результати дисертації (наукової доповіді).

Викладене дозволяє зробити висновок про те, що дисертація Шаповала

Володимира Миколайовича на тему «Моделювання еволюції сильновзаємодійної матерії у високоенергетичних зіткненнях важких ядер» 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, і рекомендується до захисту на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук зі спеціальності 01.04.02 – теоретична фізика.

Результати дисертаційного дослідження Шаповала Володимира Миколайовича на тему: «Моделювання еволюції сильновзаємодійної матерії у високоенергетичних зіткненнях важких ядер» та представлених публікацій обговорено і схвалено на засіданні відділу фізики високих густин енергії Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України (протокол № 2 від 21 квітня 2025 р.).

Головуючий на засіданні відділу
доктор фізико-математичних наук,
професор, завідувач відділу
фізики високих густин енергії



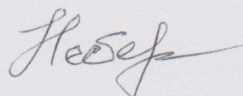
Марк ГОРЕНШТЕЙН

Рецензент
доктор фізико-математичних наук,
старший дослідник,
провідний науковий співробітник
відділу математичних методів
в теоретичній фізиці



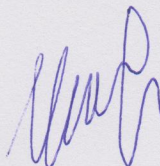
Андрій НАЗАРЕНКО

Рецензент
доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник,
старший науковий співробітник
лабораторії структури атомних ядер



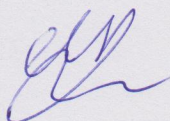
Олександр НЕСТЕРОВ

Рецензент
доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник,
завідувач відділу астрофізики
та елементарних частинок



Юрій ШТАНОВ

Секретар засідання відділу
доктор філософії,
науковий співробітник відділу
фізики високих густин енергії



Мусфер АДЖИМАМБЕТОВ