

РІШЕННЯ

щодо присудження наукового ступеня доктора наук

Спеціалізована вчена рада з присудження наукового ступеня доктора наук

Д 26.191.01 Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова

(шифр докторської ради, повне найменування закладу вищої освіти (наукової установи),

Національної академії наук України

прийняла рішення

підпорядкування (у родовому відмінку)

про присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук
(галузь науки)

Шаповалу Володимирі Миколайовичу

(прізвище, ім'я, по батькові (за наявності) здобувача у давальному відмінку)

на підставі прилюдного захисту докторської дисертації

«Моделювання еволюції сильновзаємодійної матерії у високоенергетичних зіткненнях важких ядер»

(назва докторської дисертації)

у вигляді наукової доповіді */ з грифом (при необхідності)
(на правах рукопису, опублікованої монографії, наукової доповіді)/
(таємно, для службового користування)

за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика
(шифр і назва наукової спеціальності за чинним переліком)

« 11 » вересня 2025 року, протокол №5.

Шаповал Володимир Миколайович 1988 року народження,
(прізвище, ім'я, по батькові (за наявності) здобувача)

Громадянин України,
(вказується назва держави, громадянином якої є здобувач)

освіта повна вища (магістр): закінчив у 2010 році

Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара
(найменування закладу вищої освіти)

за спеціальністю фізика.
(за дипломом)

Наукові ступені і вчені звання (перелічуються у порядку їх присудження чи присвоєння за наявності):

кандидат фізико-математичних наук з 2015 року,

старший дослідник зі спеціальності 104 – фізика та астрономія з 2024 року.

Працює старшим науковим співробітником в Інституті теоретичної фізики імені М. М. Боголюбова Національної академії наук України, м. Київ з січня 2021 р. до теперішнього часу.

Докторська дисертація виконана у відділі фізики високих густин енергії Інституту теоретичної фізики імені М. М. Боголюбова НАН України.

(назва підрозділу, найменування закладу вищої освіти, наукової установи)

Рекомендовано до захисту 9 червня 2025 року.

Здобувач має 23 наукових публікації за темою дисертації, з них 14 статей в наукових фахових виданнях, 9 матеріалів та тез конференцій.

Опоненти:

Корчин Олександр Юрійович, академік НАН України за спеціальністю ядерна фізика та енергетика, доктор фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.16 – фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій, старший науковий співробітник за спеціальністю фізика ядра і елементарних частинок, Інститут теоретичної фізики ім. О.І.Ахієзера Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» Національної академії наук України, завідувач відділу квантово-електродинамічних явищ і електродинаміки адронів дав позитивний відгук із зауваженнями:

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 кіральній 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 iНКМ 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 (який 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 iНКМ 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 фм/с, тому для полегшення читання було б корисно в Переліку умовних позначень додати, наприклад, $1 \text{ фм/с} = 3,3 \cdot 10^{-24} \text{ сек}$. Можливо, замість терміну «сильновзаємодійна матерія» можна було б використовувати термін «сильновзаємодіюча матерія», але це на розсуд автора.

Пугач Валерій Михайлович, член-кореспондент НАН України за спеціальністю ядерна фізика, доктор фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.16 – фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій, професор за спеціальністю фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій, Інститут ядерних досліджень Національної академії наук України, завідувач відділу фізики високих енергій дав позитивний відгук із зауваженнями:

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 особливості 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 напряду 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 малоймовірно, 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.

Горкавенко Володимир Миколайович, доктор фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика, доцент кафедри квантової теорії поля, Київський національний університет імені Тараса Шевченка Міністерства освіти і науки України, професор кафедри квантової теорії поля та космофізики фізичного факультету дав позитивний відгук із зауваженнями:

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.

У дискусії взяли участь члени докторської ради:

1. Станіслав ВІЛЬЧИНСЬКИЙ, доктор фіз.-мат. наук за спеціальністю 01.04.02: зауважень немає.
2. Андрій СЕМЕНОВ, член-кореспондент НАН України, доктор наук з галузі "Природничі науки" за спеціальністю 01.04.02: зауважень немає.
3. Андрій СНАРСЬКИЙ, доктор фіз.-мат. наук за спеціальністю 01.04.02: зауважень немає.
4. Сергій ПЕРЕПЕЛИЦЯ, доктор фіз.-мат. наук за спеціальністю 01.04.02: У Вас 10 висновків в цілому, і всі вони дуже детальні. Можете сформулювати 2-3 результати, такі, що можуть зрозуміти всі, хто в різних галузях працює, і щоб там було чітко зрозуміло, що ось це встановлено, це показано, щось пояснено – найбільш вагомні результати?
5. Валерій ГУСИНІН, академік НАН України, доктор фіз.-мат. наук за спеціальністю 01.04.02: зауважень немає.
6. Ярослав ЗОЛОТАРЮК, доктор фіз.-мат. наук за спеціальністю 01.04.02: зауважень немає.
7. Богдан ЛЕВ, академік НАН України, доктор фіз.-мат. наук за спеціальністю 01.04.02: зауважень немає.
8. Лариса БРИЖИК, доктор фіз.-мат. наук за спеціальністю 01.04.02: Ви вживаєте термін «м'яка фізика». Вибачте, але як Ви це розумієте, «м'яка фізика»? Я знаю, є фізика м'якої речовини, фізика якихось м'яких процесів.
9. Марк ГОРЕНШТЕЙН, доктор фіз.-мат. наук за спеціальністю 01.04.02: зауважень немає.
10. Юрій СИНЮКОВ, доктор фіз.-мат. наук за спеціальністю 01.04.02: зауважень немає.
11. Володимир ЗАСЕНКО, доктор фіз.-мат. наук за спеціальністю 01.04.02: зауважень немає.

та присутні на захисті фахівці

1. Георгій ТЕРСИМОНОВ, провідний інженер відділу фізики високих густин енергії Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України: зауважень немає.
2. Валерій ПУГАЧ, член-кореспондент НАН України, доктор фіз.-мат. наук, завідувач відділу фізики високих енергій Інституту ядерних досліджень НАН України: зауважень немає.
3. Дмитро АНЧИШКІН, доктор фіз.-мат. наук, провідний науковий співробітник відділу теорії ядра і квантової теорії поля Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України: зауважень немає.
4. Мусфер АДЖИММБЕТОВ, доктор філософії, науковий співробітник відділу фізики високих густин енергії Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України: зауважень немає.

При проведенні таємного голосування виявилось, що із 14 членів докторської ради, які взяли участь у голосуванні (з них 8 докторів наук за профілем дисертації), проголосували:

«За» 12 членів докторської ради,
«Проти» 2 члени докторської ради,
недійсних бюлетенів 0.

Висновок спеціалізованої вченої ради Д 26.191.01 Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова Національної академії наук України про дисертацію Шаповала Володимира Миколайовича «Моделювання еволюції сильновзаємодійної матерії у високоенергетичних зіткненнях важких ядер», представлену на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

Дисертаційна робота Володимира Шаповала присвячена вирішенню низки важливих та актуальних проблем сучасної фізики високих енергій, пов'язаних з теоретичним дослідженням властивостей та характеру еволюції систем, що формуються у зіткненнях важких ядер за високих енергій.

Дисертаційне дослідження здобувач виконав 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.

Дисертацію представлено у формі наукової доповіді за сукупністю статей, що опубліковані у престижних фахових журналах, індексованих у базах Scopus та/або Web of Science Core Collection. У цих публікаціях В. Шаповалу належить суттєвий або вирішальний внесок. Публікації належать до кuartилів Q1–Q2 (13 робіт) та кuartиля Q3 (1 робота) за даними SCImago Journal and Country Rank. Ці статті є підрозділами дисертації. Ще 9 наукових праць опубліковані у матеріалах і тезах наукових конференцій та засвідчують апробацію результатів дисертації. Представлені публікації в достатній мірі висвітлюють усі основні результати дисертаційної роботи, які виносяться на захист.

Актуальність теми дослідження обумовлена необхідністю теоретичного опису еволюції сильновзаємодійної матерії, що утворюється в актуальних експериментах з релятивістських ядро-ядерних зіткнень на сучасних прискорювачах частинок, як-от Великий адронний колайдер (LHC) та Релятивістський колайдер важких іонів (RHIC). На одній з проміжних стадій таких зіткнень утворюється нова форма сильновзаємодійної матерії – кварк-глюонна плазма (КГП), в якій відбувається деконфайнмент кольорових зарядів кварків і глюонів, що за звичайних умов утримуються у складі безбарвних адронів. Для кварк-глюонної плазми характерна надзвичайно висока густина енергії і температура. Вважається, що в стані КГП перебував увесь Всесвіт за часів порядку кількох мікросекунд після Великого вибуху. Властивості КГП в експерименті досліджуються не напряму, а шляхом аналізу даних щодо кінцевих адронних спостережуваних, які стосуються сукупності частинок, народжених в результаті розпаду утвореного згустку матерії. Тому для надійної та коректної інтерпретації експериментальних даних принципово важливим є аналіз механізмів формування адронних спостережуваних в рамках теоретичних моделей. У своїй дисертації здобувач досліджує процеси еволюції систем, що утворюються у зіткненнях важких ядер за високих енергій, на основі комп'ютерних симуляцій в рамках реалістичної інтегрованої гідрокінетичної моделі (iHKM).

Винесені на захист результати дисертації є новими, зроблені висновки належним чином обґрунтовані. Серед оригінальних результатів дисертаційної роботи, отриманих здобувачем особисто, можна виділити наступні:

- Інтегровану гідрокінетичну модель (iHKM) вперше відкалібровано для опису зіткнень ядер свинцю на Великому адронному колайдері при енергії 5.02 TeV на нуклонну пару. При зафіксованих значеннях параметрів моделі вдалося одночасно описати широкий клас адронних спостережуваних в області м'якої фізики та зробити передбачення для фемтоскопічних радіусів піонів і каонів.

- Вперше проведено порівняння результатів моделювання у iHKM при двох рівняннях стану кварк-глюонної плазми на гідродинамічній стадії еволюції системи. З'ясовано, що обидва розглянуті рівняння стану (кожне з яких передбачає власну температуру адронізації) дозволяють однаково добре описати експериментальні дані за умови відповідного перенормування початкової густини енергії у центрі системи при переході до іншого рівняння стану. Важливу роль відіграє адронна стадія зіткнення, врахування якої дозволяє компенсувати різницю у значеннях спостережуваних, що може мати місце в кінці гідродинамічної стадії при використанні різних рівнянь стану КГП.

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

- Здобувач виявив відхилення поведінки піонних фемтоскопічних радіусів в області найменших значень поперечної маси від степеневого закону, характерного для середніх її

значень. Незвичний характер імпульсної залежності радіусів для надм'яких піонів може свідчити про триваліше їх утримання в центрі системи та утворення своєрідної «пастки» для таких частинок.

- В рамках моделі НКМ з'ясовано, що на фінальній 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 від центральних до периферичних зіткнень. На відміну від цього, на ідентифікацію довгоживучих резонансів $\phi(1020)$ перерозсіювання на адронній стадії впливають слабо, так що виходи ϕ майже не залежать від центральності зіткнення. Отримані результати свідчать про те, що система частинок, утворена при адронізації згустку КГП, продовжує еволюціонувати як єдине ціле ще впродовж 5–10 фм/с. Це говорить на користь поступового заморожування хімічного складу та імпульсних спектрів при описі еволюції системи, утвореної в релятивістському зіткненні ядер.

- Отримано оцінки на часи випромінювання піонів і каонів у зіткненнях важких ядер при різних енергіях колайдерів RHIC та LHC. Те, що знайдені значення часів емісії для каонів є більшими, ніж для піонів, свідчить про сильний вплив взаємодій між адронами на пізньому етапі зіткнення на каонні спостережувані. Зокрема, важливу роль грають перерозсіювання та рекомбінація продуктів розпаду резонансів $K^*(892)$, що є важливим джерелом вторинних каонів.

- Дисертант пропонує новий метод оцінки загального часу життя систем, що народжуються у високоенергетичних зіткненнях ядер, заснований на фітуванні імпульсних спектрів та поздовжніх фемтоскопічних радіусів піонів і каонів в області малих поперечних імпульсів. Для зіткнень ядер свинцю на колайдері LHC відповідний час життя оцінено у 17 фм/с.

- Запропоновано вдосконалену аналітичну модель баріон-антибаріонних кореляцій, яка враховує ефект залишкових кореляцій та результати моделі iНКМ щодо ефективних розмірів джерела емісії відповідних частинок. Вирішено проблему видимої двократної відмінності між радіусами джерел випромінювання пар протон-лямбда та протон-антилямбда в експериментальній роботі колаборації STAR. Визначено довжину розсіювання сильної взаємодії у 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.

Достовірність та обґрунтованість висновків і основних положень дисертації забезпечується коректною постановкою завдань дослідження, фізичною обґрунтованістю застосованих моделей, узгодженням результатів комп'ютерних симуляцій з експериментальними даними, їх ретельним та різнобічним аналізом. Результати опубліковані у високореєтингових наукових журналах та пройшли апробацію на всеукраїнських та міжнародних конференціях.

Теоретичне та практичне значення результатів дисертації полягає в тому, що вони є вагомим внеском у дослідження властивостей сильновзаємодійної матерії, яка утворюється у зіткненнях ядер за високих енергій, та у поглиблення розуміння динаміки цих процесів. Одержані результати можуть бути використані при аналізі та інтерпретації експериментальних даних, а також стимулювати нові експериментальні дослідження на сучасних прискорювачах частинок. Визначена у дисертації довжина розсіювання протон-антилямбда може бути використана для вдосконалення існуючих моделей адрон-адронної взаємодії та каскадних моделей. Результати роботи можуть слугувати підґрунтям для вдосконалення теоретичного опису еволюції матерії у реалістичних моделях зіткнень важких іонів.

Таким чином, дисертаційна робота Володимира Шаповала є кваліфікаційною науковою працею, що виконана на високому науковому рівні, включає нові методологічні аспекти та вагомі результати фундаментального характеру.

Усі матеріали докторської дисертації є новими та оригінальними. Наукові результати кандидатської дисертації В. М. Шаповала «Кореляційна фемтоскопія в динамічних моделях ядро-

ядерних та протон-протонних зіткнень” (2014) не включені у представлений докторській дисертації.

За своїм змістом дисертація відповідає профілю спеціалізованої вченої ради Д 26.191.01 та паспорту спеціальності 01.04.02 – теоретична фізика.

Спеціалізована вчена рада Д 26.191.01 вважає, що за своєю актуальністю, за рівнем і обсягом проведених наукових досліджень, їхньою науковою новизною, теоретичною і практичною цінністю, рівнем та кількістю публікацій дисертаційна робота “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, що висуваються до докторських дисертацій, а її автор, Шаповал Володимир Миколайович, заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

На підставі результатів таємного голосування та прийнятого висновку докторська рада присуджує

Шаповалу Володимир Миколайовичу

(прізвище, ім'я, по батькові (за наявності) здобувача у давальному відмінку)

науковий ступінь (наукового ступеня) доктора фізико-математичних наук
(галузь)

за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика
(шифр і назва наукової спеціальності)

Головуючий на засіданні
спеціалізованої вченої ради з
присудження наукового ступеня
доктора наук



Д 26.191.01
(шифр ради)

(підпис)

Богдан ЛЕВ
(власне ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
з присудження наукового
ступеня доктора наук

(підпис)

Ярослав ЗОЛОТАРЮК
(власне ім'я ПРІЗВИЩЕ)

«16» вересня 2025 року