

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Директор Інституту теоретичної фізики

М. М. Боголюбова НАН України

академік НАН України

Анатолій ЗАГОРОДНІЙ

“ 19 ” серпня 2022 р.

**ВИТЯГ**

з протоколу № 21 від 17 серпня 2022 р. засідання  
відділу фізики високих густин енергії  
Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України

**СЛУХАЛИ:** аспіранта відділу фізики високих густин енергії Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України Аджимамбетова Мусфера Даніяровича за матеріалами дисертаційної роботи “Спектри та кореляції частинок в ядро-ядерних і протон-протонних зіткненнях з високою енергією та множинністю”, що висувається на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

**ПРИСУТНІ:**

керівник семінару – заступник директора з наукової роботи, доктор фіз.-мат. наук, В. І. Засенко;  
доктор фіз.-мат. наук, проф. М.І. Горенштейн;  
доктор фіз.-мат. наук, проф. Ю.М. Синюков;  
доктор фіз.-мат. наук, проф. Є.С. Мартинов;  
доктор фіз.-мат. наук, академік НАН України, Ю.І. Ізотов;  
доктор фіз.-мат. наук, О.А. Борисенко;  
доктор фіз.-мат. наук, Л.Л. Єнковські;  
кандидат фіз.-мат. наук, Ю.О. Карпенко;  
кандидат фіз.-мат. наук, В.М. Шаповал;  
кандидат фіз.-мат. наук, Р.В. Побережнюк;  
кандидат фіз.-мат. наук, В.О. Челноков;  
кандидат фіз.-мат. наук, С.М. Волошин;  
кандидат фіз.-мат. наук, В.О. Гнатовський;  
кандидат фіз.-мат. наук, В.І. Жаба;  
кандидат фіз.-мат. наук, С.О. Омельченко;  
кандидат фіз.-мат. наук, Ю.А. Міщенко;

О.В. Савчук,  
В.О. Кузнєцов,  
А.В. Демський.

**УХВАЛИЛИ:** вважати дисертаційну роботу М.Д. Аджимамбетова “Спектри та кореляції частинок в ядро-ядерних і протон-протонних зіткненнях з високою енергією та множинністю” завершеним науковим дослідженням і затвердити такий висновок.

### ВИСНОВОК

Дисертаційна робота Аджимамбетова Мусфера Даніяровича “Спектри та кореляції частинок в ядро-ядерних і протон-протонних зіткненнях з високою енергією та множинністю” написана за матеріалами робіт, що виконані ним під час навчання в аспірантурі в Інституті теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України (2018-2022 рр.) у відділі фізики високих густин енергії. Тема дисертації затверджена на засіданні вченої ради Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України від 27 грудня 2018 р., керівником призначено доктора фіз.-мат. наук, професора Ю.М. Синюкова.

#### Актуальність роботи.

Протягом останніх десятиліть експерименти по зіткненню важких іонів невинно розвиваються. Починавши з розсіянь пучків ядер з енергією декілька МеВ/нуклон на фіксованій мішені, що проводились у малих лабораторіях університетів, зараз ми маємо великі міжнародні проєкти. У багатьох сучасних експериментах прискорюються як ядра-снаряди, так і ядра-мішені, а відповідні енергії можуть досягати декількох ГеВ на нуклон.

Матерія, що утворюється внаслідок зіткнення за таких енергій, має густину в сотні разів більшу за ядерну за нормальних умов. Вважається, що за таких фізичних умов кварки і глюони -- елементарні частинки квантової хромодинаміки, яка відповідає за Сильну взаємодію у Стандартній моделі, -- знаходяться у фазі деконфайнменту, тобто перестають бути пов'язані у адрони і можуть вільно переміщуватися на відстані більші за типові розміри нуклонів.

Сукупність експериментальних даних вказує на те що, попри стрімке розширення новоутвореної матерії та її швидке охолодження до температур при яких відновлюється конфайнмент, у системі досить швидко досягається локальна термічна рівновага, а рух частинок має колективний характер близький за своїми властивостями до поведінки майже ідеальної рідини. У

сучасній фізиці така форма матерії має назву кварк-глюонної плазми (КГП). Вважається, що у перші мікросекунди після Великого вибуху Всесвіт був надто гарячим для формування адронів, натомість він мав би бути заповненим кварк-глюонною плазмою. Схожі фізичні умови можна очікувати у ядрах масивних компактних космічних об'єктів таких як, наприклад, нейтронні зорі, в центрі яких також очікується формування КГП. Таким чином однією з ключових задач експериментів по зіткненню ультра-релятивістських важких іонів є вивчення фазової діаграми КХД та відтворення фізичних умов раннього Всесвіту у лабораторних умовах.

Однією з перешкод що стоять на шляху до вивчення КГП є неможливість спостерігати її напряму – в експериментах детектуються лише фотони, лептони і адрони. Це вимагає побудови складних моделей, що могли б описати динаміку усєї еволюції системи від моменту зіткнення ядер до детектування новоутворених частинок. Окрім того, важливою задачею є створення нових та вдосконалення існуючих методів аналізу даних, що дозволили б за отриманими даними відтворити якомога більше інформації про систему на ранніх етапах її еволюції, в тому числі про властивості КГП. Прикладом такого методу є так званий фемтоскопічний аналіз.

Окремою можливістю дослідження КГП є розширення просторових та часових меж досліджуваних систем. З одного боку існують спроби модифікацій існуючих колайдерів та побудови нових, для підвищення енергій експерименту. За таких умов розміри і час існування КГП би збільшились, що могло б висвітлити нові особливості таких систем. Проте сучасна фізика розвивається і в інший бік, обмежуючи мінімальний розмір краплини КГП. Підказку в цьому напрямі можна шукати у сучасних експериментах по зіткненню протонів при енергіях Великого адронного колайдера (LHC), а саме у подіях з великою множинністю народження адронів. Аналізуючи нові дані таких експериментів, можна зробити ряд спостережень, що свідчать про гідродинамічну поведінку утвореної системи, аналогічно до зіткнень важких іонів. Це може свідчити про наявність локальної термалізації у протон-протонних зіткненнях. Водночас у випромінненні частинок з таких систем спостерігається високий рівень когерентності, що проявляється у низьких значеннях інтерсепту квантово-статистичних кореляційних функцій ідентичних бозонів та є нетиповим для термічних систем. Таким чином інтерпретація цих результатів може стати важливим кроком до розуміння фазової діаграми КХД та фізики раннього Всесвіту.

Дисертація присвячена розробці моделей для опису м'якої фізики у високоенергетичних ядро-ядерних зіткненнях та протон-протонних зіткненнях з високою множинністю. На основі вже існуючих, а також нових моделей проведено опис та зроблено передбачення для виходів адронів різних

сортів, їх спостережуваних імпульсних спектрів, еліптичних потоків та кореляцій, які включають ефекти пов'язані зі статистикою частинок, зокрема Бозе-Ейнштейнівську конденсацію та когерентність випромінювання.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота була виконана у відділі Фізики високих густин енергії Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова Національної академії наук України у рамках академічної теми "Пошук нових форм сильновзаємодійної матерії в зіткненнях адронів та ядер за високих енергій". Шифр 1.4.1, номер державної реєстрації в УкрІНТЕІ 0118U003197, (2018 – 2022).

Окрім того, робота пов'язана з такими державними та академічними програмами, що виконувались у Інституті теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова Національної академії наук України:

1. Програмно-цільова та конкурсна тематика НАН України "EUREA: Європейська угода з ультрарелятивістських енергій" Етап 3: "Фемтоскопічний аналіз народження адронів в релятивістських зіткненнях ядер". Номер державної реєстрації 0120U103315, (2020).
2. Програмно-цільова та конкурсна тематика НАН України "Фундаментальні властивості матерії в релятивістських ядерних зіткненнях та у ранньому Всесвіті". Номер державної реєстрації 0120U100935, (2020-2021).
3. Програмно-цільова та конкурсна тематика НАН України "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". Номер державної реєстрації 0122U002516, (2022).
4. Програмно-цільова та конкурсна тематика НАН України "Фундаментальні властивості матерії та їх прояви в мікросвіті, астрофізиці та космології". Номер державної реєстрації 0122U002259, (2022).

**Метою досліджень**, проведених у дисертації, є встановлення властивостей сильновзаємодійної матерії, що народжується у високоенергетичних ядро-ядерних та протон-протонних зіткненнях.

Для її досягнення було поставлено такі задачі:

- модифікація та калібрування інтегрованої гідро-кінетичної моделі для її

подальшого застосування до опису адронних спостережуваних у ядро-ядерних зіткненнях;

- описання основних адронних спостережуваних, а саме: залежностей множинності народження частинок від центральності зіткнення, інтегрованих виходів адронів різних типів, поперечних спектрів частинок та анізотропії її випромінювання, а також інтерферометричних розмірів систем;
- оцінка на часи максимального випромінювання піонів та каонів із системи, що народжується у ядро-ядерних зіткненнях;
- дослідження залежності інтерферометричних розмірів системи на кінцевій фазі її існування від множинності народження частинок та від її початкових розмірів;
- інтерпретація останніх експериментальних результатів, щодо двочастинкових квантово-статистичних кореляцій у протон-протонних зіткненнях.

Серед **найбільш важливих наукових результатів**, отриманих у роботі, семінар відзначає такі:

- знаходження нових особливостей у динаміці еволюції систем, що народжуються в ультрарелятивістських ядро-ядерних зіткненнях
- описання основних адронних спостережуваних у всіх сучасних ультрарелятивістських колайдерних експериментах по зіткненню важких ядер
- оцінки на основі інтерферометричні спостережувані у зазначених експериментах
- оцінка часів максимального випромінювання каонів та піонів із систем, що народжуються у зіткненнях золота за найвищої енергії прискорювача RHIC
- уточнення гіпотези скейлінгу у фемтоскопічній інтерферометрії
- інтерпретація деяких експериментальних даних, щодо інтерферометричних спостережуваних у протон-протонних зіткненнях з високою множинністю.

### **Практичне значення одержаних результатів.**

Робота має теоретичний характер. Отримані результати можуть бути використані для дослідження властивостей сильновзаємодійної матерії, що народжується у ядро-ядерних та протон-протонних зіткненнях, шляхом аналізу впливу зміни відповідних параметрів моделі на кінцеві спостережувані фізичні величини.

### **Особистий внесок здобувача.**

У роботі [1-6] інтегровану гідро-кінетичну модель іНКМ модифіковано, відкалібровано та застосовано для опису адронних спостережуваних у зіткненнях ядер золота за енергії  $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$  на прискорювачі RHIC та зіткнень ядер ксенону за енергії  $\sqrt{s_{NN}} = 5.44 \text{ TeV}$  на прискорювачі LHC. Встановлено нові властивості моделі.

У роботах [1-6] встановлено нові властивості іНКМ, проведено фемтоскопічний аналіз для основних ультрарелятивістських експериментів по зіткненню важких ядер на LHC та RHIC. В рамках моделі для систем з однаковою множинністю народження частинок встановлено кореляцію між їх кінцевими інтерферометричними розмірами від початкового геометричного розміру. Такий результат є уточненням гіпотези скейлінгу в інтерферометричній фемтоскопії.

У роботах [7-9] було застосовано метод квазірівноважного статистичного оператора для інтерпретації експериментальних результатів щодо інтерферометричної фемтоскопії у протон-протонних зіткненнях на LHC. Проведено аналітичні та чисельні розрахунки для залежностей інтерферометричних розмірів та інтерсептів кореляційних функцій від множинності системи.

**Основні результати дисертації** викладені у 9 журнальних публікаціях:

- [1] Yu. Sinyukov, M. Adzhymambetov, V. Naboka, V. Shapoval, "The prethermal stage of heavy-ion collision and the particle production", *Acta Phys.Polon.Supp.* **11**, (2018).
- [2] Yu. Sinyukov, M. Adzhymambetov, V. Naboka, V. Shapoval, "The femtосcopy scales in Au+Au collisions at the top RHIC energy", *Acta Phys.Polon.Supp* **12**, (2019).
- [3] M. Adzhymambetov, V. Shapoval, Yu. Sinyukov, "Description of bulk observables in Au+Au collisions at top RHIC energy in the integrated hydrokinetic model", *Nuclear Physics A* **987**, (2019).
- [4] Yu. Sinyukov, M. Adzhymambetov, V. Shapoval, V. Naboka, "Femtoscopic structure of relativistic heavy ion collisions in the Integrated HydroKinetic Model", *Physics of Particles and Nuclei* **51**, (2020).
- [5] Yu. Sinyukov, M. Adzhymambetov, V. Shapoval. "Particle production in Xe+Xe collisions at the LHC within the Integrated Hydrokinetic Model", *Particles* **2020**, (2020).
- [6] V. Shapoval, M. Adzhymambetov, Yu. Sinyukov, "Femtосcopy 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**, (2020).
- [7] M. Adzhymambetov, Yu. Sinyukov, "Inclusive spectra and Bose-Einstein

correlations

in small thermal quantum systems", *Phys. Rev. D* **102**, (2020).

[8] M. Adzhymambetov, S. Akkelin, Yu. Sinyukov, "Bose-Einstein momentum correlations at fixed multiplicities: Lessons from an exactly solvable thermal model for pp collisions at the LHC", *Phys. Rev. D* **103**, (2021).

[9] M. Adzhymambetov, S. Akkelin, Yu. Sinyukov, "Fixed particle number constraint in a simple model of a thermal expanding system and pp collisions at the LHC", *Phys. Rev. D* **105**, (2021).

### **Апробація результатів дисертації.**

Результати дисертаційної роботи доповідались на таких семінарах та конференціях:

GDR International Workshop "Heavy Ions at Relativistic Energies", 14 - 20 липня, Нант, Франція, 2019; XIV Workshop on particle correlation and femtoscopy, 03 - 07 червня, JINR Дубна, 2019; The II International Workshop on Theory of Hadronic Matter Under Extreme Conditions, 16 - 19 вересень, JINR Дубна, 2019; XI conference of young scientists "Problems of theoretical physics", 21 - 23 грудня, Київ, Україна (онлайн), 2020; Семінар "Проблеми теоретичної фізики" для студентів, аспірантів і наукових працівників, 17 березня та 13 жовтня, Київ, Україна (онлайн), 2021; XII conference of young scientists "Problems of theoretical physics", 21 - 23 грудня, Київ, Україна (онлайн), 2021;

### **Характеристика особистості здобувача.**

М.Д. Аджимамбетов закінчив фізичний факультет Київського національного університету імені Тараса Шевченка (кафедра квантової теорії поля) у 2018 році, отримав диплом магістра фізики, і вступив до аспірантури Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України. Виконавши навчальний план М.Д. Аджимамбетов закінчує аспірантуру у 2022 році.

Позитивні відгуки про здобувача висловили, завідувач відділу фізики високих густин енергії, доктор фіз.-мат. наук, проф. М.І. Горенштейн, а також науковий керівник аспіранта доктор фіз.-мат. наук, проф. Ю.М. Синюков.

**УХВАЛЕНО:**

1. Затвердити висновок про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації Аджимамбетова Мусфера Даніяровича “Спектри та кореляції частинок в ядро-ядерних і протон-протонних зіткненнях з високою енергією та множинністю”.
2. Визнати, що за актуальністю, ступенем наукової новизни, обґрунтованістю, науковою та практичною цінністю здобутих результатів дисертація Аджимамбетова М.Д. відповідає спеціальності 104 Фізика та астрономія та вимогам **Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії та доктора наук у закладах вищої освіти (наукових установах)**, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 23 березня 2016 р. № 261, пп. **6, 7, 8 Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії**, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.
3. Рекомендувати дисертацію Аджимамбетова М.Д. “Спектри та кореляції частинок в ядро-ядерних і протон-протонних зіткненнях з високою енергією та множинністю” до захисту на здобуття ступеня доктора філософії у разовій спеціалізованій вченій раді за спеціальністю 104 Фізика та астрономія
4. Рекомендувати вченій раді Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України затвердити склад разової спеціалізованої вченої ради:

**Голова ради:**

**Борисенко Олег Анатолійович**, доктор фіз.-мат. наук, провідний науковий співробітник відділу фізики високих густин енергії Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України.

**Рецензенти:**

**Горенштейн Марк Ісакович**, доктор фіз.-мат. наук, професор, завідувач відділу фізики високих густин енергії Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України.

**Сітенко Юрій Олексійович**, доктор фіз.-мат. наук, професор, чл.-кор. НАН України, завідувач відділу теорії ядра і квантової теорії поля Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України.

**Офіційні опоненти:**

**Корчин Олександр Юрійович**, доктор фіз.-мат. наук, чл.-кор. НАН України, завідувач відділу квантово-електродинамічних явищ та електродинаміки адронів Національного наукового центру "Харківський фізико-технічний інститут".

**Скалозуб Володимир Васильович**, доктор фіз.-мат. наук, професор, академік АН вищої освіти України, завідувач кафедри теоретичної фізики Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

Секретар засідання  
старший науковий співробітник  
кандидат фіз.-мат. наук

Володимир ШАПОВАЛ



Заступник директора з наукової роботи  
Інституту теоретичної фізики  
ім. М. М. Боголюбова НАН України,  
доктор фіз.-мат. наук

Володимир ЗАСЕНКО

