

## ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу **Аджимамбетова Мусфера Даніяровича**

«Спектри та кореляції частинок в ядро-ядерних і протон-протонних зіткненнях з високою енергією та множинністю»,

поданої на здобуття наукового ступеня доктора філософії

за спеціальністю 01.04.02 – Теоретична фізика

10 Природничі науки (104 Фізика і астрономія)

Представлена дисертаційна робота присвячена опису процесів, що відбуваються при зіткненні релятивістських ядер та протонів в умовах експериментів на сучасних колайдерах. Основною метою досліджень є теоретичне вивчення процесу еволюції адронів, які утворилися при зіткненнях, враховуючи всі його фази а також фізичний аналіз та інтерпретація імпульсних спектрів, отриманих в експериментах. У якості бази використано інтегровану гідро-кінетичну модель, яка була розроблена раніше, та добре себе зарекомендувала при більш низьких енергіях зіткнень. В роботі вона була значно розширена для умов, які досліджуються. Характерною рисою дисертації є трактування просторово-часових аспектів процесів, з єдиного погляду. Також були запропоновані нові аналітичні моделі, які мають явні розв'язки, що дозволяє більш глибоко дослідити вплив різних чинників та характеристик систем.

**Актуальність обраної теми** обумовлена поточними та новими експериментами у фізиці високих енергій, що вимагають теоретичного пояснення або його покращення. Ефекти, що виникають при зіткненні важких ядер та протонів високих енергій, потребують всебічного аналізу і різноманітних порівнянь, оскільки вони в основному спрямовані на відкриття та дослідження властивостей нового стану матерії – кварк-глюонної плазми (КГП), яка безпосередньо спостерігатися не може за причини явища конфайнмента при низьких енергіях. Дослідження КГП відповідають явищам, що відбувалися у ранньому всесвіті у перші мільйонні долі секунди після Великого вибуху. Ці явища великою мірою впливали на подальшу еволюцію навколишнього світу.



З погляду розвитку теоретичної фізики, застосовувані автором методи і наближення є типовими для сучасної фізики високих енергій. Вони широко відомі науковій громадськості. Разом з тим, є гостра потреба використання потужних математичних засобів, що також є важливою ознакою сучасної фізики високих енергій.

**Дисертація складається з** анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку літератури з 126 найменувань, 30 рисунків та 5 таблиць. Кожен розділ дисертації містить вступ та висновки.

У Розділі 1 представлено принципи побудови та моделювання у інтегрований гідро-кінетичній моделі (іНКМ). Описані етапи еволюції та їх загальні властивості відповідних фаз. Їх послідовність, що містить пояснення основних концепцій даної тематики, уведені основні параметри, які використовуються в дослідженні, їх роль на різних етапах еволюції та можливі зв'язки, співвідношення, оцінки часу термалізації, і т. ін.

У Розділі 2 відкалібрована у попередньому розділі іНКМ застосована для фемтоскопічного аналізу ультрарелятивістських ядро-ядерних зіткнень на LHC та RHIC. Отримана гарна збіжність з існуючими експериментальними даними. У ході проведених досліджень проведено моделювання чотирьох експериментів зіткнення важких ядер для всіх експериментів LHC та найвищих енергій RHIC. Було виявлено порушення гіпотези скейлінгу і встановлено залежність інтерферометричного розміру системи на кінцевій стадії еволюції з її початковими розмірами. Це становить одне з важливих досягнень роботи.

У Розділі 3 розроблено аналітичну модель протон-протонних зіткнень при енергіях LHC. Для цього був застосований метод квазірівноважного статистичного оператора для моделі невзаємодіючого скалярного поля у нерелятивістському випадку. Вивчалися випадки канонічного ансамблю у малому просторовому об'ємі та великого канонічного ансамбля. Були зроблені інтерпретації даних фемтоскопічного аналізу малих систем, які утворюються в ультрарелятивістських зіткненнях  $p + p$  на LHC. Виявилось, що для систем для систем, які утворюються в сучасних експериментах, теплові довжини квантів є співрозмірними з геометричними розмірами системи. Це ускладнює фемтоскопічний аналіз і вимагає розробки нових більш адекватних методів досліджень. З цією метою було запропоновано нову концепцію частково когерентного ансамблю. За допомогою цих ідей



авторам вдалося проінтерпретувати дані, отримані колабораціями ATLAS і LHCb. Це дає нове розуміння властивостей систем малих систем, які утворюються при зіткненнях протонів. Виникають прояви кінцевого об'єму, а не відсутності рівноваги або конденсатів. Це вагомий результат. Він повинен враховуватися в подальших дослідженнях із даної тематики.

У Розділі 4 проведено фемптоскопічний аналіз подій з фіксованою множинністю у протон-протонних зіткненнях. З цією метою аналіз із попереднього розділу був перенесений на систему з канонічного ансамблю. Також, у цьому розділі досліджено вплив гідродинамічного розширення системи на формування спектрів та кореляційних функцій. Було показано, що наявність колективного потоку в системі підсилює ефекти, що виникають при фіксації множинності системи. Достатньо детальний аналіз передбачає нові особливості для  $A + A$  експериментів. Нерідко різниця між спостережуваними величинами в ядро-ядерними та протон-протонними змінними пояснюється відсутністю термодинамічної рівноваги в малих системах. Однак, іноді це має відношення і для термічних систем за певними умовами. Останні результати мають загально методологічний характер. Вони є цікавими і потребують подальших досліджень.

Перейдемо до аналізу отриманих результатів.

### **Ступінь обґрунтованості наукових положень і висновків, сформульованих у дисертації**

Результати, здобуті автором, ґрунтуються на фізично розумних та загально прийнятих наближеннях, уявленнях про етапи еволюції і проміжних станів у адронних зіткненнях високих енергій. Вони спираються на певний попередній досвід та досягнення ІНКМ та розширюють її можливості, враховують нові умови експериментів. Розділи дисертації, присвячені аналітичним модельним дослідженням також відповідають сучасним уявленням і методам квантової теорії поля в екстремальних умовах. Таким чином, результати автора є фізично обґрунтованими і мають вагоме практичне значення.

### **Новизна**

На захист винесено низку результатів, які є добре представленими, всі вони, на мій погляд, є новими. Особливо цікавими, з точки зору розвитку теорії поля, є останні два розділи. Спостереження Бозе-Ейнштейнівської конденсації у не термодинамічних системах, які мають малі геометричні розміри, без сумніву, вимагає більш детального вивчення. Як правило,



розглядається термодинамічна границя для отримання конденсату, і таке інше. Інший, не зв'язаний безпосередньо з цим результат, є швидка термалізація системи в процесі еволюції. Як можна розуміти, вона не залежить істотним чином від відсутності чи наявності механічної (чи хімічної) рівноваги. Це нагадує відому задачу Улама-Паста про те, за скільки зіткнень між частинками в певному об'ємі виникає рівноважний розподіл, наприклад, Максвелла? Відповідь – одне – для достатньої великої кількості частинок. Це також добре відомий результат. Однак кількість частинок не точно визначена. Дуже важливим виглядає й аналіз придатності фемтоскопічних методів у процесах при високих енергіях.

### **Опубліковані праці**

Дисертація написана за результатами 9 робіт. Більшість з них опублікована в провідних міжнародних журналах. Результати дисертації також усно доповідались на багатьох фахових міжнародних конференціях, і тому можуть вважатися загально відомими та апробованими.

### **Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих працях**

Результати дисертації достатньо повно відображені в публікаціях, але іноді викладені більш спрощено. Також в дисертації не приводиться повною мірою порівняння з результатами інших робіт та підходів, яке можна знайти в статтях. Кваліфікаційна робота вимагає приділяти цьому більше уваги. Втім, спрощення змісту дисертації можна вітати, оскільки вона містить велику кількість розрахунків.

### **Недоліки**

У представлених результатах важко знайти недоліки. Іде систематичний аналіз у межах використаної моделі та порівняння з даними експериментів. В роботі присутня значна кількість стилістичних одно типових помилок.

Можна відзначити, скоріше побажання, при розробленні теорії з нерівноважними функціями розподілу. Пропущена, або не відома автору дисертації, дуже важлива робота Л. В. Келдиша «Диаграммная техника для неравновесных процессов», ЖЭТФ (1964), том 47, вып. 4 (10), стр.1515, з нерівноважною функцією розподілу. На мій погляд, це корисна робота, її метод. Але ці недоліки не впливають на загальне позитивне враження про дисертацію.

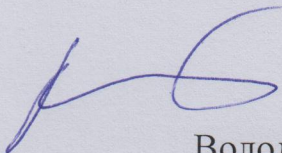
Підсумовуючи, в дисертації розв'язано чималу кількість сучасних і актуальних задач. Вони є базовими задачами для тематики проходження



проходження високоенергетичних заряджених частинок крізь речовину.  
Вважаю, що дисертаційна робота Аджимамбетова Мусфера Даніяровича  
«Спектри та кореляції частинок в ядро-ядерних і протон-протонних  
зіткненнях з високою енергією та множинністю» задовольняє всім вимогам  
МОН України до кандидатських дисертацій, зокрема пп. 9, 10 та 12 «Порядку  
присудження наукових ступенів і наукового звання старшого наукового  
співробітника», затвердженого постановою №567 Кабінету Міністрів  
України від 24.07.2013, а її автор, безумовно, заслуговує на присудження  
йому наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 01.04.02 –  
теоретична фізика.

Офіційний опонент

Доктор фіз.-мат. наук, професор



Володимир СКАЛОЗУБ

Підпис В. Скалозуба засвідчую,

