

# ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу **Мінаєва Павла Євгенійовича**

«Динаміка кварк-глюонної плазми в присутності сильних магнітних полів у стандартній моделі елементарних частинок»,

поданої на здобуття ступеня доктора філософії

10 Природничі науки (104 Фізика і астрономія)

Представлена дисертаційна робота присвячена опису процесів, які відбуваються у кварк-глюонній плазмі, що може утворитися при зіткненні релятивістських ядер або протонів в умовах експериментів на сучасних колайдерах. Основною метою досліджень є теоретичне вивчення процесу генерації магнітних та хромагнітних полів. У якості бази використано метод ефективного потенціалу в квантовій теорії поля, який був розроблений раніше, та є стандартним при розгляді взаємодіючих квантованих полів при скінченній температурі. В роботі у порівнянні з існуючими в літературі були значно розширені обчислення ферміонного сектору стандартної моделі, а саме, кварків для умов, які досліджуються. Характерною рисою дисертації є аналітичні обчислення та представлення результатів у високотемпературному поданні. Також були запропоновані нові критерії, що можуть слугувати сигналами утворення кваркової матерії в сучасних експериментах.

**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, зокрема, комп'ютерних, засобів, що також є важливою ознакою сучасної фізики високих енергій.

**Дисертація складається з** анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку літератури з 82 найменувань, 15 рисунків та 4 таблиць. Кожен розділ дисертації містить вступ та висновки.

У Розділі 1 сформульовані актуальні питання теоретичного опису матерії за критичних умов. Розглядається формалізм фонового поля для опису процесів в присутності електромагнітного поля. Вводиться основний математичний апарат та методологія обчислень при скінченній температурі. Проводиться аналіз сучасної літератури стосовно обчислень ефективного потенціалу та параметрів кварк-глюонної плазми.

У Розділі 2 детально досліджується створення в КГП полів  $B_3$ ,  $B_8$ ,  $H$  при температурах близьких до температури ФПД та оцінено напруженості згенерованих полів. Використовується формалізм уявного часу. Розраховується ефективний однопетльовий потенціал  $V(B_3, B_8, H, T)$  з урахуванням глюонів і  $u$ -,  $d$ - і  $s$ -кварків при скінченній температурі. Ця конфігурація полів є стабільною завдяки внескам дейзі-діаграм, які компенсують уявну частину однопетльового ефективного потенціалу заряджених глюонів. Для оцінки напруженості поля використане асимптотичне високотемпературне розвинення, отримане методом перетворення Мелліна. Це становить одне з важливих досягнень роботи.

У Розділі 3 розглядаються вплив магнітних полів на процеси за температур значно вищих за температуру деконфайнменту. Досліджується можливість генерації магнітних полів під час електрослабкого фазового переходу, який відбувся в ранньому Всесвіті за високої температури. До цього фазового переходу, коли Всесвіт був гарячим, частинки були безмасовими і симетрія відновленою. При охолодженні симетрія порушилася і через наявність ненульового скалярного конденсату калібрувальні  $Z$  та  $W^\pm$  бозони набули масу. Розраховано повний однопетльовий потенціал стандартної моделі з врахуванням внесків від дейзі-діаграм, показана можливість генерації магнітних та хромомагнітних полів за високої температури. Оцінена напруженість генерованих полів. Показано, що фазовий перехід у стандартній моделі (для сучасної маси скалярного бозона Хіггса 125 GeV) не задовольняє критеріям Сахарова і тому модель потребує модифікацій.. Це новий вагомий

результат. Він повинен враховуватися в подальших дослідженнях із даної тематики.

У Розділі 4 розглядається розширення стандартної моделі другим дуплетом скалярних полів. Утворена модель є сучасною теорією, в рамках якої відбувається багато досліджень. Зараз вивчення нейтрино, моделювання кандидатів на частинки темної матерії, пояснення існуючих розбіжностей зі СМ часто проводять в рамках 2HDM. Параметричний простір моделі є надзвичайно багатим, що дозволяє шукати області, де можна задовольнити умови Сахарова. Існує багато теоретичних обмежень, які вже відомі, відносно скалярного потенціалу. Врахування їх є обов'язковим при моделюванні. Комп'ютерними методами проведено моделювання вільних параметрів ефективного потенціалу та отримає можливі маси нових частинок, у припущенні слабкого порушення  $Z_2$  –симетрії та фіксованій масі найлегшого нейтрального бозона на рівні 125.09 GeV.. 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 взаємодію кварків та інших частинок у зіткненнях при високих енергіях. Вони спираються на певний попередні результати отримані методом фонового поля та розширюють його 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 другий та третій розділи. Спостереження спонтанної намагніченості кварк-глюонної плазми, без сумніву, вимагає більш детального вивчення бо є важливим новим ефектом. Інший, не зв'язаний безпосередньо з цим результат, є врахування впливу намагніченості на електрослабкий фазовий перехід та перевірка критеріїв Сахарова. Як можна розуміти, намагніченість впливає на

процеси, що відбувалися в ранньому Всесвіті і ці внески варто враховувати в космологічних моделях. Дуже важливим виглядає й аналіз придатності дводуплетної моделі для опису взаємодії при високій енергії.

### **Опубліковані праці**

Дисертація написана за результатами 4 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 проведено повною мірою порівняння з результатами інших робіт та підходів, яке можна знайти в існуючій літературі. Кваліфікаційна робота вимагає приділяти цьому більше уваги. Втім, спрощення змісту дисертації можна вівати, оскільки вона містить велику кількість розрахунків.

### **Недоліки**

У представлених результатах важко знайти недоліки. Іде систематичний аналіз у межах використаної моделі та проводяться аналітичні обчислення. В роботі присутня значна кількість стилістичних одно типових помилок.

Можна відзначити, скоріше побажання, при аналізі результатів отриманих в рамках теорії поля порівняти їх з гідродинамічними моделями кварк-глюонної плазми. Показати можливість покращення гідродинамічних моделей за рахунок врахування намагніченості, адже сьогодні кварк-глюонна плазма вивчається багатьма методами. Результати отримані різними методами повинні корелювати та бути погодженими. Але ці недоліки не впливають на загальне позитивне враження про дисертацію.

Підсумовуючи, в дисертації розв'язано значну кількість сучасних актуальних задач. Вони є базовими для тематики зіткнення важких іонів або поведінки матерії в критичних умовах. Всі розділи дисертації є взаємопов'язаними. Дисертація виконана на належному математичному рівні і встановлює паралелі з теорією фазових переходів, теорією елементарних частинок та фізикою високих енергій.



Вона є завершеним, самостійним дослідженням, що повністю відповідає паспорту спеціальності. В сукупності представлені результати є значним досягненням для розвитку теорії та опису сильно взаємодіючої речовини. Вважаю, що дисертаційна робота Мінаєва Павла Євгенійовича «Динаміка кварк-глюонної плазми в присутності сильних магнітних полів у стандартній моделі елементарних частинок», відповідає всім вимогам пп. 14, 15 та 16 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України №44 від 12.01.2022, а її автор, безумовно, заслуговує на присудження йому ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 Фізика та астрономія.

Офіційний опонент,

Доктор фізико-математичних наук, професор

Юрій Синюков



Підпис *Юрій Синюков*  
засвідчую:  
Зав. відділу кадрів  
«\_\_» \_\_\_\_ 20\_\_ р.