

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертацію

**Мінаєва Павла Євгенійовича**

«Динаміка кварк-глюонної плазми в присутності сильних магнітних полів у

Стандартній моделі елементарних частинок»,

подану на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю

104 – Фізика та астрономія

Дисертаційна робота Мінаєва П. Є. присвячена дослідженню можливості спонтанного генерування інтенсивних магнітних та хромагнітних полів у кварк-глюонній плазмі (КГП) при температурах поблизу фазового переходу деконфайнменту (ФПД) та електрослабкого фазового переходу (ЕСФП). У роботі на основі аналітичного розгляду показана необхідність виникнення таких полів, обчислено їх величини та продемонстровано їх вплив на температури, що відповідають цим фазовим переходам. Також у даній роботі розроблено чисельну методику побудови параметричного простору дводуплетного розширення Стандартної моделі з метою подальшого дослідження можливості існування ЕСФП першого роду в рамках такої теорії.

Кварк-глюонна плазма є унікальним станом матерії, який повинен реалізовуватись за надвисоких температур і тисків. Особливістю такого стану є можливість кварків вільно подорожувати в межах усього об'єму плазми, який може значно перевищувати характерні розміри нуклона. Ця властивість відома як деконфайнмент. Вона принципово відрізняє КГП від більш «звичної» речовини при менш критичних умовах, у якій існування «нескомпенсованого» кольору на масштабах, більших за розмір нуклона, вважається таким, що не є можливим. Незважаючи на відносно давнє теоретичне передбачення такого стану речовини, наразі відкритим залишається питання, чи справді КГП може реалізовуватися в природі. Теоретичні розрахунки свідчать, що температура деконфайнменту має досягатися при параметрах, що можуть бути реалізовані на колайдерах RHIC та LHC. Експерименти з зіткнення важких релятивістських іонів на цих прискорювачах нібито свідчать про можливість утворення КГП у цих процесах. Втім, одностайного трактування результатів цих експериментів на користь такого утворення наразі немає. Існує ряд індикаторів, що можуть свідчити про утворення КГП, як-от відносне збільшення виходу дивних частинок або електрон-позитронних пар, пригнічення адронних джетів та ін. Втім, нові пропозиції щодо можливих інших індикаторів КГП є наразі

актуальними. У даній дисертаційній роботі показана можливість існування подібного індикатора, пов'язаного з наявністю магнітного поля, що має генеруватися при ФПД.

Іншим важливим аспектом дослідження КГП є розуміння еволюції нашого Всесвіту, адже, у випадку існування деконфайнменту в природі, він мав проявлятися на початкових етапах цієї еволюції, коли температура і тиск у Всесвіті були достатньо високими і баріонна матерія ще не сформувалася. Особливий інтерес при цьому представляє питання про характеристики ЕСФП, зокрема про те, якого роду був цей фазовий перехід. Актуальність цього питання пов'язана з проблемою пояснення баріонної асиметрії нашого Всесвіту, адже, згідно з відомою теорією А. Д. Сахарова, така асиметрія могла виникнути лише у випадку, коли такий перехід був першого роду. Дослідженню питання про тип ЕСФП, властивості КГП поблизу цього фазового переходу, а також про розширення Стандартної моделі з метою відкриття можливостей для виконання умов Сахарова присвячена значна частина даної дисертації. Все це зумовлює **актуальність** даної дисертаційної роботи.

Зміст і структура дисертаційної роботи повністю відповідають вимогам, які висуваються до дисертацій на здобуття вченого ступеня доктора філософії: робота містить 128 сторінок друкованого тексту і складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 81 найменування та двох додатків.

У **вступі** автор обґрунтовує актуальність теми дисертаційної роботи, формулює мету та завдання досліджень, наводить методи досліджень та наукову новизну отриманих результатів, вказує їх практичне значення та свій особистий внесок, наводить список конференцій, де проводилася апробація результатів, та список опублікованих робіт за темою дисертації.

У **першому розділі** обговорюється проблема введення зовнішнього поля у неабелевих калібрувальних теоріях, вводиться поняття ефективного потенціалу, обговорюється його нормування, представлено його загальну форму в однопетльовому наближенні.

**Другий розділ** присвячено дослідженню можливості існування у КГП інтенсивних магнітних та хромоманітних полів при температурі, вищій за температуру ФПД. Розгляд проведено методом мінімізації ефективного потенціалу системи, що розглядається. Потенціал обчислюється в однопетльовому наближенні з урахуванням дейзі-діаграм, що автоматично

призводить до скорочення «нефізичної» уявної частини потенціалу. Потенціал обчислюється для системи полів, що містить легкі кварки ( $u$ ,  $d$ ,  $s$ ), глюони, скалярне поле (поле Хіггса), а також магнітні та хромоманітні поля, що досліджуються. З використанням перетворення Мелліна в даному розділі отримані високотемпературні асимптотики для даного потенціалу, які є зручними для проведення процедури його мінімізації. Отримано числові значення магнітних та хромоманітних полів, що відповідають мінімуму потенціалу. Показана можливість генерації таких полів внаслідок вивільнення (деконфайнменту) кольору при ФПД. Показано, що наявність зазначених магнітних полів у КГП має помітно знижувати температуру деконфайнменту. Даний висновок робиться на основі отриманого результату щодо температури, при якій магнітні поля у КГП зникають, і яка ототожнюється з температурою ФПД. Зазначено, що магнітні поля у КГП, що досліджуються, можуть слугувати додатковим індикатором утворення такої плазми, через те що їх наявність безпосередньо пов'язана з явищем деконфайнменту, а самі вони мають помітно впливати на перерізи різноманітних процесів, що відбуваються в середовищі, що досліджується.

У **третьому розділі** досліджено можливість генерування інтенсивних магнітних і хромоманітних полів в області набагато більш високих температур поблизу ЕСФП. Отримано високотемпературні асимптотики для ефективного потенціалу, що є придатними для даних значень температур. Потенціал тут обчислювався для системи полів, що містить усі типи кварків, глюони, електрослабкі калібрувальні бозони, скалярне поле та магнітні і хромоманітні поля. Для даного випадку показана можливість генерації магнітних і хромоманітних полів, що на кілька порядків перевищують відповідні поля при температурах ФПД. Для порівняння розглянута ситуація з наявністю лише скалярного поля. Показано, що врахування внесків усіх інших фундаментальних частинок Стандартної моделі, а також магнітних і хромоманітних полів помітно зменшує температуру ЕСФП. Особливу увагу приділено дослідженню типу електрослабкого фазового переходу. Показано, що за наявності лише скалярного поля для сучасного значення маси бозона Хіггса цей перехід має бути другого роду, тоді як першого роду даний фазовий перехід міг би бути лише для значно менших значень цієї маси. Продемонстровано, що врахування внесків інших частинок Стандартної моделі, а також магнітних і хромоманітних полів загалом не змінює тип зазначеного

фазового переходу, що залишає актуальною проблему виконання одного з критеріїв Сахарова щодо виникнення баріонної асиметрії у нашому Всесвіті.

**Четвертий розділ** присвячено дослідженню розширення Стандартної моделі на випадок існування двох дуплетів скалярних полів. У якості мотивації для такого дослідження зазначено пошук можливості задовільнити вище зазначений критерій Сахарова виникнення баріонної асиметрії Всесвіту, а саме необхідність електрослабкому фазовому переходу бути першого роду. В даному розділі проведений ряд попередніх досліджень, необхідних для такого пошуку в подальшому. Зокрема, обчислено скалярний потенціал, що відповідає системі частинок, передбачених даною розширеною дводуплетною моделлю. Розроблено чисельний метод мінімізації цього потенціалу з урахуванням усіх відомих на сьогоднішній день обмежень, що мають на нього накладатися. На основі цього методу проведено генерування параметричного простору цієї моделі і визначені діапазони можливих значень мас нових частинок, передбачених даною моделлю. Розгляд проведено для відомого з експерименту значення маси бозона Хіггса.

Таким чином, у дисертації **отримано ряд нових результатів**, які поглиблюють наше знання про фізичні властивості, які мають бути характерними для речовини у стані кварк-глюонної плазми в області температур поблизу фазового переходу деконфайнменту та електрослабкого фазового переходу, а також розроблено метод генерування параметрів дводуплетного розширення Стандартної моделі, який відкриває нові можливості для дослідження проблеми баріонної асиметрії Всесвіту. Дисертація **відповідає спеціальності 104 – Фізика та астрономія**.

Результати проведеного дослідження опубліковано в 5 статтях. Із них 3 – в наукових фахових виданнях України, одне з яких індексується в міжнародній наукометричній базі Scopus, 2 – в зарубіжних спеціалізованих виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science. Результати роботи були представлені на багатьох фахових наукових конференціях. Більшість статей опубліковано дисертантом у співавторстві. Втім, у дисертаційній роботі чітко виділено особистий внесок здобувача. Тому особистий внесок П. Є. Мінаєва в дисертаційну роботу є визначальним.

Наукові положення та методи, на яких базується дисертаційна робота, є **цілком обґрунтованими**. Винесені на захист результати дисертації є новими, вони апробовані на багатьох наукових конференціях та опубліковані у фахових



вітчизняних та міжнародних журналах. Дисертаційна робота оформлена згідно з чинними вимогами до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії. Результати роботи, що виносяться на захист, викладені змістовно, є необхідні посилання на важливі праці за темою дослідження.

По змісту дисертації можна зробити наступні **зауваження**:

1) У термодинаміці поняття температури вводиться для систем, що перебувають у стані термодинамічної рівноваги (принаймні, локальної). Бажано було б аргументувати можливість використання в дисертаційній роботі поняття температури для кварк-глюонної плазми (причому, єдиної температури в усьому її об'ємі), адже у процесах, де очікується утворення такого стану матерії (зіткнення важких іонів, початкові етапи еволюції Всесвіту), речовина мала б існувати у дуже нерівноважному стані.

2) У дисертації часто згадуються дейзі- або рінг-діаграми, але вони ніде не зображені графічно. Бажано було б для більшої наочності це зробити.

3) У роботі зазначається, що виникнення магнітного поля у КГП є енергетично вигідним. Але відповідного чисельного порівняння значення ефективного потенціалу у точці його мінімуму за наявності магнітного поля та за його відсутності не наведено. Бажано було б явно представити таке порівняння.

4) У підрозділі 2.4 і далі за допомогою перетворення Мелліна отримано, як зазначається, наближені вирази для нескінченного ряду з функцій Макдональда. Але все виглядає так, ніби тут виконується низка точних математичних перетворень. Бажано було б зазначити, чому отримані при цьому вирази (зокрема  $S_{1,2}^{High}$ ) є наближеними, у чому полягає це наближення і на якому етапі воно робиться.

5) Дисертація містить декілька підрозділів із математичними перетвореннями, де за допомогою перетворення Мелліна знаходяться наближені вирази для рядів з функціями Макдональда та Якобі. Ці підрозділи, як на мене, дещо переривають викладення матеріалу. Можливо, варто було б в основному тексті навести подібне обчислення лише для одного ряду, а випадки з іншими рядами перенести у додатки.

6) У дисертації трапляються місця, де низка великих за розміром формул записується повторно, після того, як вона вже була наведена у попередніх підрозділах. Можливо, краще було б у цих випадках замість самих формул навести просто посилання на них.

Втім, наведені зауваження не стосуються основних результатів роботи, а деякі з них мають рекомендаційний характер. Ці зауваження не впливають на важливість отриманих результатів і загальну високу оцінку дисертації, яка є завершеною науково-дослідною роботою. Її новизна, актуальність та обґрунтованість результатів не викликають сумнівів.

Таким чином, 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 наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія.

Провідний науковий співробітник  
Інституту теоретичної фізики  
імені О. І. Ахієзера ННЦ ХФТІ,  
доктор фіз.-мат. наук, старший дослідник

Сергій ТРОФИМЕНКО

Підпис С. В. Трофименка засвідчую,  
Вчений секретар  
Національного наукового центру  
«Харківський фізико-технічний інститут»



Олександр ВОЛОБУЄВ