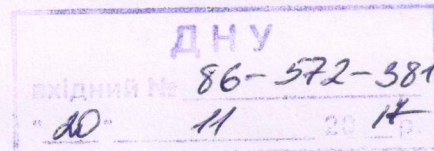


## ВІДГУК



офіційного опонента на дисертацію **Гулова Олексія Володимировича** «Сигнали  $Z'$  бозона в сучасних та майбутніх експериментах з фізики високих енергій», подану на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика

Дисертаційна робота Гулова О.В. «Сигнали  $Z'$  бозона в сучасних та майбутніх експериментах з фізики високих енергій» присвячена галузі сучасної фізики високих енергій, що інтенсивно розвивається протягом останніх років. Ця галузь отримала назву так званої «нової фізики», що означає фізичні явища поза межами Стандартної моделі (СМ) елементарних частинок. Пошук таких явищ проводиться на лептонних і адронних прискорювачах високих енергій. Аналіз експериментів щодо можливого існування нових важких частинок, нових симетрій (таких як велике об'єднання взаємодій, суперсиметрія), додаткових розмірностей простору та інше, традиційно присутній в публікаціях колаборацій CMS, ATLAS, LHCb на Великому адронному коллайдері (LHC) у Європейському центрі ядерних досліджень (CERN), у Національній лабораторії Фермі (Fermilab, США) та інших провідних центрах, які ведуть роботу на передньому краю фізики високих енергій.

**Актуальність теми** дисертаційної роботи не викликає сумнівів, особливо у зв'язку із набуттям Україною асоційованого членства в CERN у 2016 році. Ці дослідження безпосередньо лежать у руслі досліджень в CERN, і на основі роботи дисертанта, Дніпропетровським національним університетом подано пропозиції до дорожньої карти співробітництва України з CERN.

Важкий нейтральний векторний  $Z'$  бозон є одним з поширених варіантів нової фізики. Дійсно, хоча б одна додаткова нейтральна векторна частинка присутня в будь-якій моделі великого об'єднання взаємодій, що розширюють СМ. Цей нейтральний  $Z'$  бозон є проміжним станом у реакціях анігіляції та розсіювання кварків або лептонів в основному порядку теорії збурень, що підвищує ймовірність його відкриття. Основними фізичними параметрами  $Z'$  бозона є його маса та константи взаємодії з лептонами та кварками. Експериментатори в першу чергу концентруються на визначенні маси  $Z'$  бозона, що пов'язано із можливостями детектування

частинки як резонансу у перерізі розсіювання при енергії зіткнень в околі маси частинки.

Для визначення констант взаємодії  $Z'$  бозона з ферміонами (лептонами і кварками) обираються декілька типових моделей нової фізики, в яких ці константи приймають різні значення. Ці константи взаємодії стають важливими у спостережуваних ефектах  $Z'$  бозона поодаль від резонансу, оскільки тоді маса перестає бути вирішальним фізичним параметром.

**Новизна дисертаційної роботи** полягає в наступному. Робота присвячена методикам вимірювання констант взаємодії  $Z'$  бозона з лептонами та кварками в різних реакціях на сучасних прискорювачах, та комплексній обробці даних різних експериментів. Такий підхід є новим, він відкриває можливість вимірювати взаємодії  $Z'$  бозона із ферміонами замість перевірки обмеженої кількості різних теоретичних моделей. Чисельні значення констант взаємодії  $Z'$  бозона, які одержані в дисертації в результаті комплексного аналізу експериментальних даних, - це можливо найперша в літературі вдала спроба визначити ці важливі параметри  $Z'$  бозона.

Ключовою ідеєю дисертаційної роботи можна вважати конструювання спеціальних спостережуваних для виділення та вимірювання констант взаємодії  $Z'$  бозона з ферміонами (розділи 2-5). Ці спостережувані побудовано шляхом інтегрування диференціального перерізу за певними областями кінематичних змінних. Для різних процесів ці області кінематичних змінних обираються так, щоб виділити потрібний сигнал та забезпечити найбільшу статистичну ефективність обробки даних. Цей оригінальний метод є ефективним для сучасних експериментів та перспективним для проектів майбутніх прискорювачів.

Новим і оригінальним результатом, хоча і дещо віддаленим від основного напрямку дисертаційної роботи, є дослідження фазового переходу в скалярному секторі квантової теорії в залежності від константи взаємодії (розділ 6). У дисертації вперше надано послідовний розв'язок тривалого спору в літературі стосовно роду фазового переходу в моделях скалярного поля. В дисертації, на основі комп'ютерного експерименту Монте Карло на решітці, показано, що в області надзвичайно слабких взаємодій, яка до цього взагалі не досліджувалась у численних комп'ютерних експериментах, спостерігається фазовий перехід першого роду, тоді як при посиленні взаємодії відтворюються відомі результати щодо фазового переходу другого роду. Те, що род фазового переходу змінюється в залежності від зна-

чення константи взаємодії вже у найпростішій скалярній моделі – безперечно новий результат.

**Достовірність і обґрунтованість результатів дисертації** обумовлена тим, що в дослідженнях детально враховувалися систематичні похибки, а саме: при обчисленні перерізів розсіювання за допомогою теорії збурень, при застосуванні партонних функцій розподілів кварків у адронах, при чисельних оптимізаціях тощо. Було використано апробоване та добре відоме математичне програмне забезпечення (FeynArts, FormCalc, LoopTools, ZFITTER, партонні функції MSTW). При формулюванні висновків автор порівнював результати обробки процесів розсіювання різними методами – їх взаємна узгодженість (наприклад, табл. 3.5 в дисертації або табл. 3 у авторефераті) виключають випадкові похибки в аналізі. У комп'ютерному експерименті Монте Карло на решітці використовувався відомий алгоритм Метрополіса, було досліджено незалежність результатів від скінченного об'єму. Визначення роду фазового переходу за «гістерезисним» типом залежності параметру порядку від температури є апробованою методикою, яка раніше застосовувалась у квантовій хромодинаміці (КХД) на решітці.

**Практична значимість** результатів дисертації пов'язана з тим, що, фактично, створено каталог значень максимальної правдоподібності та інтервалів довіри для констант взаємодії  $Z'$  бозона з лептонами та кварками, які можна використовувати при оцінці ефектів від існування  $Z'$  бозона при розгляді різних проблем фізики високих енергій. Розроблені спостережувані можуть бути застосовані для відкриття частинки не тільки на адронному коллайдері LHC, а і в умовах майбутнього міжнародного лінійного коллайдера. Дослідження стосовно фазового переходу в скалярній моделі можуть бути цікавими у низькоенергетичній КХД та у фізиці конденсованого стану.

Результати дисертації повною мірою викладено у 21 публікації, серед яких 11 статей індексуються у наукометричній базі Scopus (див. <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602151898>). Автореферат дисертації вірно висвітлює зміст дисертації та її основні результати. Дисертація та автореферат добре структуровані і написані ясною мовою. Всі результати, що винесені на захист, одержані автором особисто.

**До дискусійних питань, зауважень та недоліків у дисертації можна віднести наступні:**

1. У розділі 1 згадуються експерименти з нейтральними струмами при низьких енергіях, зокрема, дані щодо порушення парності в атомах важких хімічних елементів, реакції з нейтронами та нейтрино тощо. Однак, ці дані не включаються до комплексного аналізу при вимірюванні констант взаємодії  $Z'$  бозона. Чи можливе врахування цих даних і як вони могли би вплинути на одержані значення констант взаємодії  $Z'$  бозона з ферміонами?

2. У таблиці 2.4 на стор.102 показано комбіновані (“combined”) значення аксіальної константи взаємодії  $a^2$  за результатами різних експериментів LEP II. Було би корисним навести формули, за якими розраховані комбіновані значення за значеннями різних експериментів. Як враховуються при цьому похибки експериментів?

3. У розділі 1.1.3 згадуються результати ATLAS і CMS відносно надлишку у спектрі двох фотонів при 750 ГеВ як можливого сигналу нової фізики. Фактично, цей ефект було „закрито” у серпні 2016 року після значного підвищення статистики на LHC.

4. На мій погляд, було б доцільно більш детально обговорити у розділі 1.2.3 співвідношення для констант  $Z'$  бозона, та нагадати, як вони виводяться для абелева і кірального  $Z'$  бозона. Навіть якщо такі співвідношення не є результатом цієї роботи, вони є дуже важливими для подальшого аналізу в дисертації.

5. Врахування часткової поляризації електронів та позитронів в умовах майбутнього міжнародного лінійного колайдера (ILC) зводиться в роботі до ефективного множника для неполяризованого перерізу розсіювання, а самі спостережувані конструюються, виходячи з неполяризованого перерізу розсіювання у розділі 2. Цікаво було би дослідити, чи можна покращити виділення сигналу  $Z'$  бозона, якщо розглядати переріз для поляризованих лептонів.

Є також декілька технічних зауважень, пов'язаних з оформленням роботи.

1. На рисунках 5.8 і 5.9 використовується занадто малий шрифт для позначення чисел, на графіках 2.7, 2.9 та 6.2 також важко розгледіти числа.
2. На рисунках 2.2, 2.4, 2.5, 2.6, 2.7, 2.8, 2.9, 2.10 не вказана змінна вдовж осі абсцис, хоча і можна здогадатися, що це  $z = \cos \theta$ .

Однак наведені зауваження не впливають на достовірність і значимість одержаних автором результатів, і не знижують загальну вельми позитивну оцінку дисертації Гулова О.В.

На мій погляд дисертаційна робота Гулова Олексія Володимировича є закінченою науково-дослідною роботою. Здобуті в дисертації результати є важливими для подальшого розвитку фізики високих енергій, і зокрема для пошуку проявів „нової фізики” на сучасних і майбутніх прискорювачах. Результати можуть бути використані в дослідженнях, що виконуються в ІТФ ім. Н.Н Боголюбова НАН України, ННЦ ХФТІ НАН України, Київському національному університеті ім. Тараса Шевченка, Харківському національному університеті ім. В.Н. Каразіна, у колабораціях CMS і ATLAS на Великому адронному коллайдері та у міжнародних проєктах майбутніх лінійних коллайдерів.

Таким чином, на підставі актуальності теми дисертації, обсягом досліджень, новизною і важливістю здобутих результатів, я вважаю, що дисертація Гулова О.В. «Сигнали  $Z'$  бозона в сучасних та майбутніх експериментах з фізики високих енергій» відповідає вимогам «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24 липня 2013 р. зі змінами, затвердженими Постановами Кабінету Міністрів України № 656 від 19 серпня 2015 р. та № 1159 від 30 грудня 2015 р., а її автор, Гулов Олексій Володимирович, заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

Офіційний опонент:

Завідувач відділу “Квантово-електродинамічних явищ і електродинаміки адронів”  
Інституту теоретичної фізики імені О. І. Ахієзера,  
Національного наукового центру “Харківський фізико-технічний інститут”  
НАН України,  
доктор фізико-математичних наук

О.Ю. Корчин

Підпис О.Ю. Корчина засвідчую.

Вчений секретар Національного наукового центру “Харківський фізико-технічний інститут” НАН України,  
кандидат фізико-математичних наук



О.В. Волобуєв

“ 10 ” 11 2017 р.