

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

**Горкавенка Володимира Миколайовича**

«Пошук проявів частинок та топологічних струноподібних об'єктів  
за межами Стандартної моделі»,

подану на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук  
за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика

Актуальність теми дисертаційної роботи Горкавенка В.М. обумовлена тим, що Стандартна модель (СМ) фізики елементарних частинок, яка описує електромагнітні, сильні та слабкі взаємодії, не може пояснити окремі спостережувані явища. Це вказує на її неповноту та необхідність модифікації. Як приклад такої неповноти можна указати на проблему існування темної матерії у Всесвіті в рамках СМ. Проблеми СМ можна вирішити припускаючи існування додаткових частинок та нових взаємодій. Різноманітні моделі розширення СМ включають як дуже легкі частинки (з масами меншими за 1 еВ), так і дуже важкі (з масами порядку масштабів теорії Великого об'єднання). Таким чином, маси нових частинок за межами СМ можуть лежати у дуже широкому діапазоні значень і шукати прояви таких частинок та нових взаємодій необхідно на різних енергетичних масштабах.

В дисертаційній роботі шукаються прояви частинок різної природи за межами СМ в сучасних експериментах з високою світністю (CERN SHiP (SPS), DUNE (Fermilab), експерименти на Великому адронному колайдері). Іншим цікавим напрямком роботи є дослідження прояву полів раннього Всесвіту (за межами СМ), що можуть зберегтися до наших днів в лінійних топологічних об'єктах (космічних струнах). Було показано, що поля раннього Всесвіту можуть проявляти себе і в наш час викликаючи ефекти поляризації вакууму.

Дослідження за темою дисертації Горкавенка В.М. проводилися в рамках наукових тем кафедри квантової теорії поля та космофізики Київського національного університету імені Тараса Шевченка, а також в рамках конкурсних проєктів ДФФД та Швейцарського національного наукового фонду SCOPE. Необхідно також відзначити, що Горкавенко В.М. є членом міжнародної колаборації SHiP (Search for hidden particles), що займається експериментальним пошуком частинок нової фізики.

Дисертація оформлена згідно вимог МОН України у вигляді наукової доповіді за сукупністю наукових статей за науковою тематикою. Загальний обсяг дисертації становить 298 сторінок. Основний текст дисертації складає 273 сторінок. Список використаних джерел містить 108 найменувань.

У вступі обґрунтовано тему дисертації, сформульовано мету, головні задачі, об'єкт і предмет дослідження, описано новизну одержаних результатів.

Розділ 1 присвячений пошуку проявів легких довгоживучих частинок за межами СМ з масами у декілька ГеВ.

Розділ 1.1 присвячений пошуку проявів масивних скалярних частинок в скалярному розширенні СМ. Детально досліджуються можливі канали народження та розпаду нових скалярів в умовах експериментів з високою світністю CERN SHiP, DUNE та експериментів на Великому адронному колайдері. Доведено, що в експериментах SHiP та в експериментах на Великому адронному колайдері домінуючим каналом народженням скалярів є розпад мезонів, а в експерименті DUNE народження нових скалярів відбувається головним чином при глибоко непружному протон-протонному розсіянні. Розраховані брэнчінги народження нових скалярів в розпадах К та В мезонів, включаючи народження скалярів у розпадах В мезонів у різні збуджені стани каонів

Розділ 1.2 присвячений дослідженню розширення СМ зі взаємодією типу Черна-Саймонса. В цьому випадку до СМ додається масивний векторний бозон (бозон Черна-Саймонса), котрий в околі стану бозону Гігса з мінімумом енергії взаємодіє лише з векторними полями СМ. Особливістю даної теорії є той факт, що взаємодія бозона Черна-Саймонса з ферміонними частинками генерується петльовими діаграмами Фейнмана. Було показано, що у випадку взаємодії бозона Черна-Саймонса з кварками різних ароматів, розрахунок відповідної петльової діаграми не містить розбіжності. Було побудовано ефективний лагранжіан взаємодії бозона Черна-Саймонса з нижніми кварками різних ароматів та показано, що взаємодією бозона Черна-Саймонса з верхніми кварками різних ароматів можна знехтувати. Розраховані брэнчінги для народження бозонів Черна-Саймонса в розпадах К та В мезонів, включаючи народження бозонів Черна-Саймонса у розпадах В мезонів у різні збуджені стани каонів

Розділ 1.3 присвячений розгляду нейтринної модифікації СМ (мінімальне нейтринне розширення СМ). В цьому випадку до СМ додається три масивних нейтрино з правою кіральністю. Були отримані вирази, що пов'язують елементи юкавівської матриці лагранжіану правокіральных нейтрино з елементами масової матриці активних нейтрино, значення яких відомі з даних спостережень осциляцій активних нейтрино. Це важливий результат, оскільки зазначені елементи юкавівської матриці визначають взаємодію гіпотетичних правокіральных нейтрино з частинками СМ. За допомогою отриманих співвідношень була проведена оцінка можливих значень та загальний аналіз виразу для CP-порушуючого фактора, що визначає генерацію баріонної асиметрії Всесвіту в даному розширенні СМ.

Розділ 1.4 присвячений пошуку гіпотетичного правокірального масивного нейтрино в експерименті CERN SHiP. В дисертаційній роботі розглядалося питання народження правокірального нейтрино в тричастинкових розпадах мезонів з використанням формалізму форм-факторів. Даний канал народження масивних нейтрино є важливим для побудови області чутливості експерименту CERN SHiP у певній області мас правокірального нейтрино. Результати розрахунків порівнювалися з розрахунками колаборації SHiP, в яких

використовувалися спрощені матричні елементи комп'ютерної програми RUTHIA. Було показано, що використання спрощених матричних елементів дає похибку до 10 відсотків при розрахунку області чутливості. Було показано, що правильне використання наявних спрощених матричних елементів дозволяє суттєво зменшити похибку розрахунків.

Розділ 2 присвячений розгляду ефектів поляризації вакууму (індукування вакуумної енергії) масивного скалярного поля матерії лінійним топологічним дефектом з гіпотетичним калібрувальним полем групи  $U_X(1)$  раннього Всесвіту. Задача розглядалася в просторі-часі довільної розмірності з урахуванням сталої зв'язку скалярного поля з кривизною простору-часу  $\xi$ . Космічна струна моделювалася непроникливою для полів матерії трубкою скінченого радіусу з «магнітним» полем калібрувальної групи  $U_X(1)$  раннього Всесвіту. Проводився аналіз поляризаційних ефектів в залежності від вибору граничних умов на поверхні трубки. Оскільки «магнітне» поле раннього Всесвіту міститься лише всередині трубки, а його вплив досліджується на поля матерії ззовні трубки з певними граничними умовами, то досліджувана задача має пряме відношення до ефектів Ааронова-Бома та ефекту Казимира.

Розділ 2.1 та розділ 2.2 присвячені дослідженню індукування густини вакуумної енергії для часткового випадку простору-часу розмірності  $2+1$  та випадку значення сталої зв'язку скалярного поля з кривизною простору-часу  $\xi = 1/4$ . В цьому частковому випадку математичні вирази для розрахунків мають суттєво спрощений вигляд. Задача розглядалася для випадку граничної умови на поверхні трубки типу Діріхле (розділ 2.1) та типу Неймана (розділ 2.2). Було встановлено, що ефект поляризації вакууму є суттєво більшим для випадку граничної умови типу Неймана.

Розділ 2.3 присвячений дослідженню індукування густини вакуумної енергії масивного скалярного поля у випадку простору-часу розмірності  $2+1$  та граничної умови типу Діріхле при різних значеннях сталої зв'язку скалярного поля з кривизною простору-часу  $\xi$ , а також дослідженню залежності повної індукованої енергії у вакуумі від параметра  $\xi$ . Доведено, що повна індукована енергія у вакуумі ззовні космічної струни не залежить від значення параметра сталої зв'язку скалярного поля з кривизною простору-часу  $\xi$ .

Розділі 2.4 присвячений дослідженню індукуванню повної вакуумної енергії масивного скалярного поля у випадку простору-часу довільної розмірності та граничної умови типу Діріхле. Було доведено, що ефекти поляризації вакууму будуть суттєвими лише у випадку, коли маса кванта поля матерії є суттєво меншою за масу кванта поля Гігса, що призвело до спонтанного порушення симетрії та виникнення у ранньому Всесвіті лінійного топологічного об'єкту у вигляді космічної струни.

Розділ 3 присвячений дослідженню ефектів індукування у вакуумі масивних скалярних та ферміонних полів матерії потоку звичайного магнітного поля. Як показано в дисертаційній роботі «магнітне» поле раннього Всесвіту

групи  $U_X(1)$ , що міститься всередині космічної струни, викликає струм частинок полів матерії у вакуумі ззовні струни, якщо ці частинки мають відповідний заряд по групі  $U_X(1)$ . Якщо ж поля матерії мають ще й електричний заряд, то індукований у вакуумі струм генеруватиме звичайне магнітне поле. Таким чином поле раннього Всесвіту може проявити себе і в наш час. При розгляді задачі використовувалася модель космічної струни у вигляді непроникливої для полів матерії трубки скінченого радіусу з «магнітним» полем калібрувальної групи  $U_X(1)$  раннього Всесвіту

Розділ 3.1 та розділ 3.2 присвячений розгляду задачі індукування вакуумного струму та магнітного потоку у вакуумі масивного скалярного поля матерії “магнітною” трубкою скінченого радіусу у просторі-часі довільної розмірності з граничними умовами на поверхні трубки типу Діріхле (розділ 3.1) та типу Неймана (розділ 3.2). Було показано, що ефект індукування магнітного потоку є суттєво більшим у випадку граничної умови типу Діріхле.

Розділ 3.3 є узагальненням розділів 3.1 та 3.2. Він присвячений розгляду задачі індукування магнітного потоку у вакуумі масивного скалярного поля матерії “магнітною” трубкою скінченого радіусу у конічному просторі-часі довільної розмірності з ненульовим дефіцитом кута та загальним випадком граничної умови на поверхні трубки, а саме – граничною умовою типу Робена. Було проаналізовано поведінку індукованого магнітного потоку при всіх значеннях параметра граничної умови типу Робена  $-\pi/2 \leq \theta < \pi/2$ . При цьому випадок  $\theta = 0$  відповідає граничній умові типу Діріхле, а випадок  $\theta = -\pi/2$  відповідає граничній умові типу Неймана. Аналіз розв’язків при недодатних значеннях параметра граничної умови  $-\pi/2 \leq \theta$  показав, що поведінка індукованого магнітного потоку подібна до випадків граничних умов типу Діріхле та Неймана. На проміжку  $-\pi/2 \leq \theta$  ефект є максимальним для випадку граничної умови типу Неймана та мінімальним для випадку граничної умови типу Діріхле. Аналіз задачі при додатних значеннях параметра граничної умови  $\theta < \pi/2$  показав, що окрім розв’язків неперервної частини спектру гамільтоніана системи існують також розв’язки зв’язаних станів, що відповідають дискретному спектру енергій в системі. Врахування цих двох типів розв’язків призводить до поведінки індукованого магнітного потоку, що суттєво відрізняється від випадку значень параметру граничної умови на проміжку  $-\pi/2 \leq \theta$ .

Розділ 3.4 присвячений дослідженню задачі індукування магнітного потоку у вакуумі масивного ферміонного поля матерії “магнітною” трубкою скінченого радіусу у конічному просторі-часі розмірності  $2+1$  з ненульовим дефіцитом кута. Показано, що у випадку ферміонного поля матерії накладання звичайних граничних умов типу Діріхле та Неймана на поверхні трубки призводять до суперечностей. Показано, що у випадку ферміонного поля матерії гранична умова на поверхні непроникливої трубки замінюється умовою самоспряженого розширення оператора діраковського гамільтоніана. В дисертаційній роботі явно отримано вираз для умови самоспряженого розширення та показано, що він

залежить лише від одного параметра  $\theta$ , який знаходиться в діапазоні значень  $0 \leq \theta \leq \pi$ . Проведено аналіз індукованого магнітного потоку при різних значеннях параметра самоспряженого розширення. Показано, що лише при певних значеннях параметра ( $\theta=0, \pi$ ) індукований у вакуумі ферміонного поля магнітний потік є скінченним. Показано, що при  $\theta = \pi$  квантові ефекти зростають при збільшенні радіусу «магнітної» трубки, що є нефізичним.

**Найбільшу наукову цінність, на мою думку, мають наступні отримані в дисертації результати:**

1. Знайдено домінуючі канали народження та розпаду масивних скалярів для умов експериментів з високою світністю DUNE (Fermilab), SHiP (SPS CERN) та експериментів на Великому адронному колайдері. Показано, що в експерименті SHiP (SPS CERN) та експериментах на Великому адронному колайдері народження скалярів головним чином відбувається в мезонних розпадах. В експерименті DUNE (Fermilab) народження скалярів головним чином відбувається під час глибоконепружного розсіяння нуклонів
2. Показано, що петльова взаємодія типу Черна-Саймонса векторного бозону з кварками різних ароматів не вимагає проведення процедури перенормування. Отримано вираз для ефективного лагранжіану взаємодії нового векторного бозону Черна-Саймонса з нижніми кварками різних ароматів. Показано, що взаємодією з верхніми кварками різних ароматів можна знехтувати. Знайдено брэнчінги домінуючих каналів народження масивного векторного бозону Черна-Саймонса в розпадах K та B мезонів.
3. Знайдено оригінальні розв'язки, що пов'язують елементи юкавівської матриці мінімального нейтринного розширення SM зі спостережуваними параметрами масової матриці активних нейтрино.  
Запропоновано вибір спрощених матричних елементів в програмі моделювання процесів зіткнення частинок при високих енергіях RUTHIA для опису реакцій народження правокіральных масивних нейтрино в тричастинкових розпадах, що дають найменше відхилення від коректних розрахунків.
4. В моделі космічної струни у вигляді непроникливої для полів матерії трубки з «магнітним» полем калібрувальної групи  $U_x(1)$  раннього Всесвіту для випадку граничної умови на поверхні трубки типу Діріхле показано, що повна індукована енергія у вакуумі скалярного поля матерії у просторі-часі довільної розмірності не залежить від сталої зв'язку скалярного поля з кривизною простору-часу. Показано, що ефект поляризації вакууму скалярного поля матерії в присутності космічної струни (модель непроникливої трубки з «магнітним» полем) у випадку граничної умови на поверхні трубки типу Неймана є значно більшим в порівнянні з випадком граничної умови типу Діріхле. Доведено, що ефекти поляризації вакууму полів матерії «магнітною» космічною струною будуть суттєвими лише у тому випадку, коли маса кванта поля матерії є значно меншою за масу кванта

поля Гігса, що призвело до утворення лінійного топологічного об'єкту у вигляді космічної струни.

5. Розраховано індукований магнітний потік у вакуумі квантованого масивного скалярного поля в присутності "магнітної" космічної струни в самому загальному випадку, а саме у кінчному просторі довільної розмірності при різних значеннях параметра граничної умови типу Робена.
6. Показано, що за додатних значень параметра граничної умови типу Робена поведінка індукованого магнітного потоку у вакуумі скалярного поля суттєво відрізняється від випадку граничної умови на поверхні «магнітної» трубки типу Діріхле або типу Неймана. Отримано вираз для граничної умови на ферміонне поле матерії на поверхні «магнітної» непроникливої трубки з умови самоспряженого розширення оператора діраковського гамільтоніана для випадку кінчного простору-часу розмірності 2+1. Показано, що умова самоспряженого розширення у просторі-часі розмірності 2+1 задається лише одним параметром.
7. Знайдено єдине (фізичне) значення параметра самоспряженого розширення діраковського гамільтоніана за якого індукований магнітний потік у вакуумі ферміонного поля є скінченим та спадає зі збільшенням радіусу «магнітної» трубки.

#### *Зауваження до дисертаційної роботи.*

1. В розділі 1.1 знайдені домінуючі канали реакцій для народження гіпотетичних частинок скалярного розширення СМ для умов експериментів з високою світністю при різних масштабах енергій налітаючих протонів: DUNE ( $\sqrt{s_{pp}} = 16$  GeV), SHiP ( $\sqrt{s_{pp}} = 28$  GeV) та експериментів на Великому адронному колайдері ( $\sqrt{s_{pp}} = 13$  TeV). Чому не проведені аналогічного типу розрахунки з використанням вже розробленого формалізму для випадку майбутнього кільцевого колайдера (FCC), де плануються енергії в системі центру інерції порядку 100 TeV?
2. В розділі 1.2 вказується, що петльова діаграма, яка визначає взаємодію нового векторного бозона з ферміонами однакового аромату, містить розбіжність. Не розкрито питання, чому така розбіжність взагалі може існувати, адже для виконання процедури перенормування необхідно використати контрчлени ферміон-бозонної взаємодії, яка відсутня в стартовому лагранжіані?
3. В розділі 2 суттєво більша увага була приділена розрахунку ефекту індукування вакуумної енергії скалярного поля ззовні непроникливої трубки з «магнітним» полем гіпотетичної калібрувальної групи  $U_x(1)$  раннього Всесвіту (модель струноподібного топологічного об'єкту) з граничною умовою на поверхні трубки типу Діріхле в порівнянні з випадком граничної умови типу Неймана. Чим виділений випадок

граничної умови типу Діріхле в порівнянні з іншими варіантами вибору граничної умови на поверхні трубки?

Зазначені питання та зауваження не ставлять під сумнів достовірність основних результатів дисертаційної роботи та не впливають на загальну позитивну оцінку роботи.

Результати дисертації викладено у 10 статтях (першого і другого квартилів (Q1 і Q2) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports), 2 статтях третього квартилю (Q3) та у 12 тезах українських та міжнародних конференцій. Статті опубліковано у відомих та авторитетних профільних журналах, зокрема: Physical Review D, European Physical Journal C, Journal of Physics G, Journal of High Energy Physics та інших.

Результати дисертаційної роботи апробовано на українських та міжнародних наукових конференціях серед яких: International Conference on p-Adic Mathematical Physics and its Applications (Belgrade, Serbia, 2015), The International Conference "CERN-Ukraine Cooperation: Current State and Prospects" (Kharkiv, Ukraine, 2018), New trends in high-energy physics, 21-th International conference (Odessa, Ukraine, 2019), XI Bolyai-Gauss-Lobachevsky Conference: Non-Euclidean, Non-Commutative Geometry and Quantum Physics (Kyiv, Ukraine, 2019) та інші.

Автореферат оформлено і викладено з урахуванням відповідних вимог і відображає повний обсяг досліджень, проведених в роботі. Дисертаційне дослідження відповідає спеціальності 01.04.02 – теоретична фізика.

Враховуючи актуальність теми, оригінальний характер отриманих результатів та їх наукову цінність, я вважаю, що дисертаційна робота «Пошук проявів частинок та топологічних струноподібних об'єктів за межами Стандартної моделі» за спеціальністю 01.04.02 (теоретична фізика) відповідає всім вимогам, зазначених у пунктах 7 та 9 "Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук", затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17.11.2021 року №1197, а автор дисертаційної роботи, Горкавенко Володимир Миколайович, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук.

В.о. завідувача Відділом фізики високих густин енергії  
Інституту теоретичної фізики  
ім. М.М. Боголюбова Національної академії наук України,  
доктор фізико математичних наук, професор

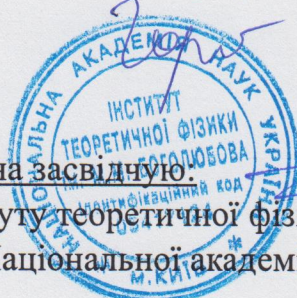
Марк ГОРЕНШТЕЙН

25.01.2024

Підпис М.І. Горенштейна засвідчую:

Вчений секретар Інституту теоретичної фізики

ім. М.М. Боголюбова Національної академії наук України,  
доктор фіз.-мат. наук



С. М. Перепелиця