

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

Дисертаційна робота Горкавенка В.М. присвячена пошуку прояву фізики за межами Стандартної моделі фізики елементарних частинок (СМ) на різних енергетичних масштабах. В роботі проводяться теоретичні дослідження, що стосуються пошуку частинок з масою порядку декількох ГеВ в експериментах з високою світністю на сучасних прискорювачах (майбутні експерименти *SHiP* (SPS CERN), *DUNE* (Fermilab) та триваючі і майбутні експерименти на LHC: HL-LHC, FCC). В роботі проводяться також теоретичні дослідження прояву фізики за межами СМ на масштабах енергій, що значно перевищують можливості сучасних прискорювачів. А саме, в дослідженні ефектів поляризації вакууму скалярних та ферміонних полів космічними струнами (лінійними топологічними об'єктами, що могли виникнути у ранньому Всесвіті).

Незважаючи на успіхи Стандартної моделі, продемонстровані підтвердженням її передбачень на прискорювачах до енергій 13.6 ТеВ, ряд фізичних явищ (осциляції нейтрино, баріонна асиметрія та темна матерія у Всесвіті) не можуть бути пояснені в її сучасних термінах. Наразі невідомо, якими мають бути частинки нової фізики (скалярні, псевдоскалярні, ферміонні чи векторні) і якою має бути їх маса.

Дослідження по темі дисертації Горкавенка В.М. проводилися в рамках досліджень кафедри квантової теорії поля та космофізики Київського національного університету імені Тараса Шевченка, а саме:

- тема №16БФ051-05 "Дослідження фундаментальних проблем фізики ядра, елементарних частинок та космофізики" (ДР №0116U002562);
- тема №19БФ051-06 "Топологічні властивості кіральної матерії та бозе-айнштейнівських конденсатів у магнітному полі" (ДР №0119U100335);
- тема №22БФ051-06 "Фундаментальні закони фізики в космології раннього Всесвіту" (ДР №0122U001957).

Робота також виконувалася в рамках проекту ДФФД №Ф54.1/019 "Ефекти неевклідової геометрії і топології в мікро- та макросистемах у зовнішніх полях" та гранту Швейцарського національного наукового фонду SCOPE IZ 7370-152581. Згідно з договором між Київським національним університетом та Європейською організацією з ядерних досліджень (ЦЕРН), Горкавенко В.М. є членом міжнародної

колаборації SHiP (Search for hidden particles), націленої на створення експериментальної методики для пошуку частинок нової фізики.

Дисертація оформлена згідно вимог МОН України і складається зі вступу, трьох розділів, висновків та списку використаних джерел (108 найменувань). Загальний обсяг дисертації становить 298 сторінок. Основний текст дисертації складає 281 сторінок.

Дисертаційна робота Горкавенка В.М. оформлена у вигляді сукупності 12 наукових статей, опублікованих протягом 20210 – 2022 років та згрупованих у три логічно обгрунтованих розділи, яким передують лаконічний вступ та на завершення наводяться компактно сформульовані висновки.

У вступі висвітлено стан наукової проблеми необхідності розширення СМ та пошуку частинок та топологічних струноподібних об'єктів за межами СМ, сформульовано мету роботи та основні завдання. Представлено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів. Надана інформація про зв'язок роботи з науковими темами; інформацію про апробацію результатів дисертації, вказана кількість публікацій та особистий внесок у них здобувача.

У розділі 1 розглянуто питання пошуку проявів легких (з масою в декілька ГеВ) частинок за межами СМ.

У розділі 1.1 розглянуто скалярне розширення СМ. В цьому випадку до лагранжіану СМ додаються доданки нового скалярного поля S та його взаємодії з частинками СМ (полем Хіггса) у найбільш загальному калібрувально-інваріантному та перенормованому вигляді. Знайдено та розраховано домінуючі канали народження та розпаду скалярних частинок для умов експериментів з високою світністю: майбутні експерименти "DUNE" ($\sqrt{s_{pp}} = 16$ ГеВ), "SHiP" ($\sqrt{s_{pp}} = 28$ ГеВ), та діючі в ЦЕРН "LHC" ($\sqrt{s_{pp}} = 13.6$ ТеВ). Показано, що в експериментах "SHiP" та в експериментах на "LHC" домінуючим каналом народженням скалярів є розпад мезонів (утворених при протон-протонних зіткненнях), а в експерименті "DUNE" домінуючим є канал народження при глибоко непружному протон-протонному розсіянні. Детально досліджено процеси народження нових скалярних частинок в розпадах K - та B -мезонів, включаючи народження скалярних частинок у розпадах B -мезонів у різні збуджені стани каонів.

У розділі 1.2 розглянуто розширення СМ зі взаємодією типу Черна-Саймонса. Розширення полягає у додаванні до лагранжіану СМ нових масивних векторних бозонів (X), що взаємодіють з полями СМ за допомогою доданків, що мають вигляд операторів розмірності 6. Важливим є те, що в околі стану поля Гігса з мінімумом енергії можна виділити доданки тричастинкової взаємодії векторного масивного бозона Черна-Саймонса з векторними полями СМ W -, Z -бозонами та фотонами у

вигляді операторів розмірності 4. Використавши цей факт, в унітарному калібруванні було розраховано петльову взаємодію векторного бозона Черна-Саймонса (ЧС) з кварками. Показано, що така петльова взаємодія не містить розбіжностей. Побудовано ефективний лагранжіан взаємодії бозона Черна-Саймонса з нижніми кварками різних ароматів. Показано, що відповідний лагранжіан взаємодії бозона ЧС містить коефіцієнти, що на 5-6 порядків менші за значеннями ніж коефіцієнти взаємодії бозона ЧС з нижніми кварками. Показано, що взаємодією бозонів ЧС з верхніми кварками різних ароматів можна знехтувати. Побудовано брэнчінги для народження бозонів ЧС в розпадах K - та B -мезонів, включаючи народження бозонів ЧС у розпадах B -мезонів у різні збуджені стани каонів

У розділі 1.3 розглянуто мінімальне нейтринне розширення SM νMSM із додаванням трьох масивних нейтрино з правою кіральністю (стерильні нейтрино). Це додає 18 нових параметрів до SM : 3 маси активних нейтрино, 3 маси стерильних нейтрино, 6 кутів змішування та 6 CP -інваріантність порушуючих фаз. В так званому калібрувальному базисі лагранжіану стерильних нейтрино були отримані рівняння, що пов'язують елементи юкавівської матриці лагранжіану стерильних нейтрино з відомими з даних спостережень нейтринних осциляцій елементами масової матриці активних нейтрино у випадку нормальної та оберненої ієрархії мас активних нейтрино. Це дозволило отримати можливі значення відношень між елементами юкавівської матриці лагранжіану стерильних нейтрино. За рахунок наявності 6 додаткових CP -порушуючих фаз в моделі νMSM збільшуються можливості для утворення великої CP -порушуючої фази в системі. Отримані результати на відношення між юкавівськими елементами дозволили оцінити діапазон значень виразу для CP -порушуючого фактора (δ_{CP}), що визначає генерацію баріонної асиметрії Всесвіту в моделі νMSM .

У розділі 1.4 розглянуто питання пошуку стерильних нейтрино в майбутньому експерименті SHiP (CERN). Детально розглянуто питання народження стерильного нейтрино з масою декілька GeV в тричастинкових мезонних розпадах, що є важливим для побудови області чутливості експерименту SHiP в певній області мас стерильних нейтрино. В дисертаційній роботі питання народження стерильного нейтрино в тричастинкових мезонних розпадах розглянуто з використанням формалізму форм-факторів. Отримані результати свідчать, що використані колаборацією SHiP (CERN) спрощені матричні елементи дають похибку в розрахунок області чутливості експерименту до 10% в цікавому для дослідження інтервалі мас стерильних нейтрино.

У розділі 2 розглянуто індукування вакуумної енергії масивного скалярного поля матерії лінійним топологічним дефектом у вигляді космічної струни з "магнітним" полем калібрувальної групи $U_x(1)$. При розв'язку цієї задачі використано модель космічної струни у вигляді непроникливої для полів матерії

трубки скінченного радіуса з "магнітним" полем та певною граничною умовою на поле матерії на її поверхні. Калібрувальне поле групи $U_X(1)$ це гіпотетичне поле за межами СМ, що могло існувати у ранньому Всесвіті в момент створення космічної струни. "Магнітне" поле калібрувальної групи $U_X(1)$ міститься лише всередині космічної струни, його вплив на вакуум полів матерії здійснюється завдяки тому, що ззовні струни є ненульовий потенціал поля (мають місце ефекти Ааронова-Бома та ефект Казимира). Використана модель дозволила розглянути квантові ефекти у вакуумі полів матерії в найбільш загальному випадку припускаючи, що поля матерії також заряджені відносно певної калібрувальної групи $U_X(1)$. Задача розглядалася у просторі-часі довільної розмірності та з урахуванням сталої зв'язку скалярного поля з кривизною простору-часу ξ .

У розділах 2.1 та 2.2 розглядалася спрощена задача індукування густини вакуумної енергії масивного скалярного поля ззовні "магнітної" трубки скінченного радіуса у частковому випадку значень параметрів та граничних умов Діріхле та Неймана. Показано, що квантові ефекти залежать від дробової частини "магнітного" потоку трубки та швидко спадають при збільшенні товщини трубки.

У розділі 2.3 розглянуто індукування густини вакуумної енергії та повної енергії у вакуумі масивного скалярного поля матерії скалярного поля ззовні "магнітної" трубки скінченного радіуса у випадку простору-часу розмірності $2+1$, граничної умови Діріхле та довільного значення сталої зв'язку скалярного поля з кривизною простору-часу. Показано, що повна індукована вакуумна енергія не залежить від значення сталої зв'язку скалярного поля з кривизною простору-часу.

У розділі 2.4 розглянуто індукування повної енергії у вакуумі масивного скалярного поля матерії скалярного поля ззовні "магнітної" трубки скінченного радіуса у випадку простору-часу довільної розмірності, граничної умови Діріхле. Показано, що ефекти поляризації вакууму будуть суттєвими у випадку, коли маса квантованого поля матерії є значно меншою за масу поля Хіггса, що призвело до спонтанного порушення симетрії і виникнення топологічного ефекту у вигляді "магнітної" космічної струни.

У розділі 3 розглянуто індукування магнітного потоку у вакуумі скалярного та ферміонного полів матерії лінійним топологічним дефектом у вигляді космічної струни з "магнітним" полем калібрувальної групи $U_X(1)$. Для розрахунків була також використана модель космічної струни у вигляді непроникливої для полів матерії трубки скінченного радіуса з "магнітним" полем. Ефект індукування магнітного потоку за наявності космічної струни матиме місце у припущенні, що поля матерії заряджені відносно калібрувальної групи $U_X(1)$, а також електрично заряджені. За рахунок взаємодії полів матерії з "магнітним" полем калібрувальної групи $U_X(1)$, що міститься всередині космічної струни, індукується вакуумний струм ззовні космічної струни, а оскільки частинки матерії електрично заряджені, то утворений струм буде і електричним струмом, який викличе появу у вакуумі зовні

струни звичайного магнітного поля. В даній задачі також мають місце ефекти Ааронова-Бома та ефект Казимира.

У розділах 3.1 та 3.2 розглянуто індукування струму та магнітного потоку у вакуумі масивного скалярного поля матерії ззовні "магнітної" трубки скінченого радіусу у випадку простору-часу довільної розмірності та граничних умов Діріхле та Неймана. Показано, що квантові ефекти залежать від дробової частини "магнітного" потоку трубки та швидко спадають при збільшенні товщини трубки.

У розділі 3.3 було розглянуто випадок індукування магнітного потоку у вакуумі масивного скалярного поля в площині, перпендикулярній космічній "магнітній" струні, в кінчному просторі-часі довільної розмірності для загального випадку граничної умови типу Робена та всіх можливих значень параметра граничної умови $-\pi/2 < \theta < \pi/2$. Випадок $\theta = 0$ відповідає граничній умові типу Діріхле, випадок $\theta = \pi/2$ відповідає граничній умові типу Неймана. Показано, що результати розв'язку задачі індукування магнітного потоку у вакуумі скалярної матерії в присутності космічної "магнітної" струни для недодатних значень параметра граничної умови Робена на якісному рівні виявилися схожими на результати задачі з граничними умовами типу Діріхле та Неймана. Для випадку додатних значень параметра граничної умови Робена було показано, що індукований магнітний потік містить внески від неперервної та дискретної частин польових розв'язків, що призвело до появи особливих значень товщини "магнітної" трубки (точки розриву значень індукованого магнітного потоку у просторі-часі розмірності $2+1$ та точки розриву для похідних функцій індукованого магнітного потоку у просторі-часі розмірності $3+1$).

У розділі 3.4 розглянуто індукування магнітного потоку у вакуумі масивного ферміонного поля в кінчному просторі-часі розмірності $2 + 1$ за наявності космічної "магнітної" струни. Випадок ферміонного поля матерії не дозволяє накладання звичних граничних умов типу Діріхле або Неймана. В цьому випадку гранична умова накладається з вимоги самоспряженого розширення оператора діраковського гамільтоніана. Показано, що гранична умова характеризується одним параметром самоспряженого розширення $0 < \theta < \pi$. Було показано, що лише для двох значень самоспряженого розширення $\theta=0, \pi$ індукований у вакуумі магнітний потік є скінченим. Однак, лише у випадку граничної умови, що задається параметром $\theta=0$, індукований магнітний потік спадає при збільшенні товщини трубки з "магнітним" полем.

В підсумку зазначу найбільш цінні і визначні, на мою думку, наукові результати, одержані і представлені здобувачем в дисертації:

- Зроблено повний і самоузгоджений опис всіх каналів народження та розпаду масивних скалярних частинок з масою в декілька GeV в скалярному розширенні SM. Знайдено домінуючі канали народження та розпаду масивних скалярних частинок для умов як майбутніх експериментів DUNE (Fermilab),

SHiP (SPS CERN) так і наразі діючих експериментів на Великому Адронному Колайдері (БАК).

- Встановлено, що в експерименті DUNE домінуючим каналом народження скалярних частинок є процес глибоко непружного розсіяння нуклонів, а в експерименті *SHiP* та експериментах на БАК домінуючим каналом народження скалярних частинок є розпад мезонів.
- Показано, що ефективна взаємодія векторного бозону Черна-Саймонса з кварками різних ароматів не вимагає застосування процедури перенормування.
- Показано, що взаємодією векторного бозону Черна-Саймонса з верхніми кварками різних ароматів можна знехтувати.
- Послідовно розглянуто всі канали народження масивного векторного бозону Черна-Саймонса з розпадів K - та B -мезонів.
- Отримано оригінальні розв'язки та виражено елементи юкавівської матриці в нейтринному розширенні СМ з параметрами масової матриці активних нейтрино.
- Запропоновано вибір спрощених матричних елементів в комп'ютерній програмі RUTHIA для опису реакцій народження правокіральных масивних нейтрино в тричастинкових розпадах, що дають найменше відхилення від коректних розрахунків. Зроблена оцінка похибки в розрахунках області чутливості експерименту SHiP для народження правокіральных масивних нейтрино в тричастинкових розпадах мезонів в рамках спрощеного моделювання RUTHIA, в порівнянні з використанням коректних матричних елементів розрахованих з використанням формалізму форм-факторів.
- За допомогою чисельних методів розрахована індукована густина енергії у вакуумі скалярного поля матерії за різних значень сталої зв'язку скалярного поля з кривизною простору-часу в присутності "магнітної" космічної струни в просторі-часі довільної розмірності, що моделюється непроникливою для полів матерії трубкою з "магнітним" полем.
- Показано, що у випадку граничної умови на поверхні трубки типу Діріхле повна індукована енергія у просторі-часі довільної розмірності не залежить від сталої зв'язку скалярного поля з кривизною простору-часу.
- Показано, що ефект поляризації вакууму квантованого зарядженого скалярного поля матерії в присутності "магнітної" космічної струни у випадку граничної умови на поверхні трубки типу Неймана є суттєво більшим в порівнянні з випадком граничної умови типу Діріхле.
- Показано, що поляризація вакууму буде суттєвою у випадку, коли маса квантованого поля матерії є значно меншою за масу поля Хіггса, що призвело до спонтанного порушення симетрії і виникнення топологічного ефекту у вигляді "магнітної" космічної струни.
- За допомогою чисельних методів розрахований досліджено поведінку індукованого магнітного потоку у вакуумі квантованого масивного

зарядженого скалярного поля в присутності "магнітної" космічної струни у кінчному просторі довільної розмірності від значень параметра граничної умови типу Робена на проміжку можливих значень цього параметра $-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$.

- Показано, що за недодатних значень параметра $-\pi/2 \leq \theta \leq 0$ індукований магнітний потік у вакуумі скалярного поля в присутності "магнітної" космічної струни є найбільшим для випадку $\theta = -\pi/2$ (гранична умова типу Неймана), а найменшим він є для випадку $\theta = 0$ (гранична умова типу Діріхле).
- Показано, що за додатних значень параметра $0 < \theta \leq \pi/2$ існують розв'язки, що відповідають зв'язаним станам. В цьому випадку індукований магнітний потік може мати більші значення та не прямувати до нуля при значно більших товщинах космічної струни в порівнянні з потоком, що індукується за граничної умови типу Робена з недодатним значенням параметра θ .
- Отримано загальний вигляд граничної умови на ферміонне поле матерії на поверхні "магнітної" трубки скінченного радіуса, виходячи з умови самоспряженого розширення оператора діраковського гамільтоніана у кінчному просторі-часі розмірності $2+1$. Показано, що гранична умова характеризується одним параметром.
- Досліджено поведінку індукованого магнітного потоку у вакуумі квантованого масивного зарядженого ферміонного поля в присутності "магнітної" космічної струни від значень параметра самоспряженого розширення. Знайдені значення параметра самоспряженого розширення, за яких повний індукований потік є скінченим.
- Показано, що умова скінченності значення індукованого потоку у вакуумі квантованого масивного зарядженого ферміонного поля в присутності "магнітної" космічної струни є недостатньою для знаходження фізичних значень параметра самоспряженого розширення. Додатковою умовою є вимога спадання величини квантових ефектів при збільшенні товщини космічної струни.

Усі одержані результати детально проаналізовано. Їх достовірність забезпечена застосуванням добре апробованих методів дослідження. Водночас, є ряд побажань та зауважень для майбутньої роботи в цьому напрямі:

1. При розгляді задачі впливу на побудову області чутливості експерименту CERN SHiP використання колаборацією SHiP спрощених матричних елементів в середовищі RUTHIA для опису народження правокіральних нейтрино в тричастинкових мезонних розпадах було оцінено похибку лише для випадку нижньої границі області чутливості. Було б добре навести розрахунки і для верхньої границі області чутливості.

2. При розгляді індукування вакуумної енергії скалярного поля матерії ззовні “магнітної” космічної струни висновок про незалежність повної індукованої енергії від сталої зв’язку скалярного поля з кривизною простору-часу зроблений лише для випадку граничної умови типу Діріхле, хоча у розділі дисертаційної роботи 2.1 розглядався випадок індукування густини вакуумної енергії і для випадку граничної умови типу Неймана. Виглядає дивним, чому в дисертаційній роботі не розглядалося питання про незалежність повної індукованої енергії від сталої зв’язку скалярного поля з кривизною простору-часу для випадку граничної умови типу Неймана.
3. При розгляді задачі індукування магнітного потоку у вакуумі ферміонного поля матерії ззовні “магнітної” космічної струни був розглянутий лише випадок простору-часу розмірності $2+1$. В дисертаційній роботі не розглянуто питання узагальнення отриманого результату для простору-часу розмірності $3+1$. Зокрема не розкрито питання кількості параметрів, які будуть входити в умову самоспряженого розширення діраковського гамільтоніана у випадку простору-часу розмірності $3+1$.
4. Визначне прикладне значення дисертаційної роботи полягає в стимулюванні експериментальних досліджень з пошуку частинок нової фізики. Сучасні експериментальні методики мають потужний технічний і програмний потенціал для вимірювання та аналізу даних мульти-диференційних поперечних перерізів генерації частинок в т.ч. в режимі реального часу. Без того високого рівня дисертація може збагатити свою значимість розрахунками мульти-диференційних поперечних перерізів із індикацією селективних сигнатур нових частинок.

Однак, зазначені зауваження не ставлять під сумнів достовірність основних результатів роботи та зроблених на їхній основі висновків, та не впливають на загальну позитивну оцінку роботи.

Результати дисертації викладено у 10 статтях (опублікованих у виданнях, віднесених до першого і другого квартилів (Q1 і Q2) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports), 2 статтях квартилю Q3 та 12 тезах міжнародних конференцій. Статті опубліковано у профільних журналах, зокрема: Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical (Q1), European Physical Journal C (Q1), Physical Review D (Q1), Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics (Q1), International Journal of Modern Physics A (Q1 та Q2), Journal of High Energy Physics (Q2), Ukrainian Journal of Physics (Q3) та ін.

Результати дисертаційної роботи апробовано на українських та міжнародних наукових конференціях: Міжнародна конференція молодих вчених та аспірантів “ІЕФ, 2011” (Ужгород, Україна, 2011), III Young Scientists Conference Modern

Problems of Theoretical Physics (Kyiv, Ukraine, 2011), 20-th Open Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics (Kyiv, Ukraine, 2013), International Conference on p-Adic Mathematical Physics and its Applications (Belgrade, Serbia, 2015), 3-rd Walter THIRRING International School "Fundamentals of Astroparticle and Quantum Physics" (Kyiv, Ukraine, 2017), 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), X Young Scientists Conference Modern Problems of Theoretical Physics (Kyiv, Ukraine, 2019), XI Young Scientists Conference Modern Problems of Theoretical Physics (Kyiv, Ukraine, 2019).

Дисертація виконана фаховою українською та англійською мовами, текстове подання матеріалу відповідає стилю науково-дослідної літератури. Автореферат оформлено і викладено з урахуванням відповідних вимог і відображає повний обсяг досліджень, проведених в роботі. Дисертаційне дослідження відповідає паспорту спеціальності 01.04.02 – теоретична фізика.

Враховуючи актуальність теми, новаторський характер отриманих результатів та їхню наукову та практичну 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, зазначеним 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 роботи Горкавенко Володимир Миколайович безперечно заслуговує на присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук.

Завідувач відділу фізики високих енергій
Інституту ядерних досліджень
Національної академії наук України,
член.-кореспондент НАН України,
доктор фізико-математичних наук,
професор

В.М. Пугач

Підпис В.М. Пугача засвідчую:

Вчений секретар
Інституту ядерних досліджень
Національної академії наук України
кандидат фіз.-мат. наук



Н.Л. Дорошко