

## 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

Стандартна модель у сучасній фізиці є однією з найуспішніших теоретичних конструкцій та описує елементарні частинки та взаємодії між ними. Однак, незважаючи на свій великий успіх у поясненні результатів численних експериментів, Стандартна модель фізики елементарних частинок (СМ) залишається неспроможною пояснити ряд спостережуваних явищ. Зокрема, існує проблема із поясненням природи темної матерії та темної енергії, які, згідно з дослідженнями, становлять значну частину Всесвіту, але не піддаються опису в рамках СМ. Проблемами також є наявність у нейтрино маси чи наявність надлишку баріонів над антибаріонами у Всесвіті, що також не знаходить свого пояснення.

На якісному рівні проблеми СМ можна пояснити зробивши припущення, що в природі існують додаткові частинки та додаткові взаємодії між ними. З теоретичної точки зору частинки за межами СМ можуть мати різну природу (бути скалярними, псевдоскалярними, векторними, ферміонними частинками) та можуть мати значення маси у досить широкому діапазоні, аж до масштабів теорій Великого об'єднання. Може виявитися, що нових частинок існує досить багато і не всі з них мають пряме відношення до вирішення проблем СМ, але їх можливе експериментальне відкриття буде надзвичайно важливим для нашого розуміння оточуючого світу.

Відповідно, тема дослідження дисертаційної роботи являє собою актуальну задачу сучасної фізики, а пошуки проявів частинок та полів за межами СМ повинні проводитися на різних енергетичних масштабах. В дисертаційній роботі розглядаються питання пошуку проявів нових легких довгоживучих частинок, з масою в декілька ГеВ, на сучасних прискорювачах, а також проводиться пошук можливих проявів полів раннього Всесвіту, що могли залишитися до нашого часу всередині лінійних топологічних струноподібних об'єктів (космічних струн).

**Дослідження за темою дисертації Горкавенка В.М. проводилися в рамках досліджень кафедри квантової теорії поля та космофізики**



**фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка:** тема №16БФ051-05 "Дослідження фундаментальних проблем фізики ядра, елементарних частинок та космофізики" (ДР №0116U002562); тема №19БФ051-06 "Топологічні властивості кіральної матерії та бозе-айнштайнівських конденсатів у магнітному полі" (ДР №0119U100335); тема №22БФ051-06 "Фундаментальні закони фізики в космології раннього Всесвіту" (ДР №0122U001957), а також гранту Державного фонду фундаментальних досліджень (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. Слід відмітити, що Горкавенко В.М. є також учасником міжнародної колаборації CERN SHiP, що займається експериментальним пошуком частинок нової фізики на передприскорювачі SPS Великого адронного колайдера.

Оформлення роботи виконане у відповідності з вимогами МОН України, а текст написаний грамотною українською мовою. За структурою дисертація поділена на вступ, три розділи, висновки та список використаних джерел, її загальний обсяг тексту складає 298 сторінок, а основний – 273 сторінки. Дисертаційна робота має вигляд наукової доповіді за сукупністю статей, об'єднаних темою дисертації. Нижче описаний зміст розділів дисертації:

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми пошуку проявів фізики за межами СМ, описано завдання дисертаційної роботи, практичне значення одержаних результатів та їхню новизну, надано перелік публікацій та інформацію про апробацію результатів, а також зазначено особистий внесок здобувача під час проведення наукових досліджень і підготовки публікацій.

**Перший розділ** присвячено питанню експериментального пошуку проявів частинок за межами СМ з масами в діапазоні декількох ГеВ, що допоможе в їх пошуках на сучасних прискорювачах в експериментах з великою світністю (intensity frontier experiments).

В підрозділі 1.1 розглядається скалярний портал, в якому до СМ вводиться нова скалярна частинка. В цьому підрозділі здійснюється пошук і розрахунки домінуючих каналів народження й розпаду нових скалярів для експериментів SHiP (SPS), DUNE (Fermilab) та експериментів на LHC.

Підрозділ 1.2 приділяє увагу теорії нових векторних частинок зі взаємодією типу Черна-Саймонса. Відповідні нові частинки (бозони Черна-Саймонса) взаємодіють лише з векторними полями СМ, а їх взаємодія з ферміонами СМ генерується петльовими діаграмами Фейнмана. Розрахунки петльової взаємодії бозонів Черна-Саймонса з кварками різних ароматів



показують, що така взаємодія не містить розбіжностей, при цьому взаємодією з верхніми кварками різних ароматів можна знехтувати порівняно зі взаємодією з нижніми кварками. Було отримано ефективний лагранжіан взаємодії бозонів Черна-Саймонса з нижніми кварками різних ароматів та детально досліджено народження нових бозонів в розпадах  $B$  та  $K$  мезонів.

Підрозділ 1.3 зосереджений на нейтринному розширенні СМ, а саме, теорії мінімального нейтринного розширення Стандартної моделі, розвинутої Шапошниковим і Асакою (2005 рік), в якій до лагранжіану СМ додаються три масивні правокіральні (стерильні) нейтрино. 18 нових параметрів, які при цьому виникають, можуть бути підібрані таким чином, що дозволяють пояснити явища баріонної асиметрії Всесвіту, осциляцій активних нейтрино та пропонують найлегше стерильне нейтрино з масою в декілька кеВ в якості кандидата на частинку темної матерії. В дисертаційній роботі знайдені розв'язки, що пов'язують елементи юкавівської матриці нейтринного розширення СМ зі спостережуваними значеннями масової матриці активних нейтрино. Це дозволило визначити діапазон можливих значень  $S\mathcal{P}$ -порушуючого фактора, необхідного для пояснення баріонної асиметрії в даному розширенні СМ. Тематика стерильних нейтрино продовжується і в підрозділі 1.4, в якому аналізуються розрахунки колаборації SHiP з побудови області чутливості до пошуку стерильних нейтрино в експерименті SHiP та оцінюється неточність при описі народження стерильних нейтрино в тричастинкових розпадах мезонів внаслідок використання спрощених матричних елементів програмного забезпечення RUTHIA. Було оцінено значення похибки розрахунків та запропоновано вибір спрощених матричних елементів, доступних в RUTHIA, для підвищення точності подібних розрахунків.

**Другий розділ** присвячено дослідженню лінійних топологічних струноподібних дефектів, що містять всередині гіпотетичне «магнітне» поле калібрувальної групи  $U_x(1)$  раннього Всесвіту (космічні струни). Розглядається індукування густини енергії вакууму та повної енергії у вакуумі масивного скалярного поля матерії в присутності космічної струни, що моделюється непроникливою для поля матерії трубкою (з «магнітним» полем) скінченного радіуса, на поверхні якої накладено певну граничну умову. При дослідженні враховувалась стала зв'язку  $\xi$  взаємодії скалярного поля з кривизною простору-часу. Підрозділ 2.1 присвячено розгляду задачі в частковому випадку простору-часу розмірності  $2+1$ , значення  $\xi=1/4$  граничної умови на поверхні трубки типу Діріхле. У підрозділі 2.2 розглядалася подібна задача, але з накладанням на поверхні трубки граничної умови типу Неймана. При цьому виявилось, що



ефект індукування енергії залежить лише від дробової частини «магнітного» потоку всередині струни, а також швидко спадає при збільшенні товщини трубки. У підрозділі 2.3 розглядалась задача за довільного значення сталої зв'язку  $\xi$ , розмірності простору-часу  $2+1$  та граничної умови типу Діріхле. Виявилось, що повна індукована енергія не залежить від значення сталої зв'язку скалярного поля з кривизною простору-часу  $\xi$ . У підрозділі 2.4 розв'язок задачі був узагальнений для простору-часу довільної розмірності.

**Третій розділ** присвячено питанню індукування магнітного потоку у вакуумі скалярного та ферміонного полів матерії в присутності лінійного топологічного об'єкту (космічної струни) з «магнітним» полем калібрувальної групи  $U_x(1)$  раннього Всесвіту. Для розв'язку задачі використовувалось припущення, що поля матерії мають електричний заряд, а також заряджені відносно калібрувальної групи  $U_x(1)$ . Як і у другому розділі дисертаційної роботи космічна струна моделюється непроникливою для полів матерії трубкою з «магнітним полем». В підрозділах 3.1 та 3.2 послідовно досліджується індукування у вакуумі масивного скалярного поля матерії струму та магнітного потоку зовні трубки з «магнітним» полем в просторі-часі довільної розмірності. На поверхню трубки скінченного радіусу накладаються граничні умови типу Діріхле та Неймана. В підрозділі 3.3 проводиться узагальнення даної задачі для випадку кінчного простору довільної розмірності та граничної умови на поверхні трубки загального виду (умова Робена), що характеризується одним параметром  $-\pi/2 < \theta < \pi/2$ . При значенні параметру  $-\pi/2$  та  $0$  гранична умова типу Робена переходить в граничну умову типу Неймана або Діріхле відповідно. Особливо цікавим виявився випадок додатних значень параметра  $\theta$ . В цьому випадку значення індукованого магнітного потоку (в просторі-часі розмірності  $2+1$ ) та значення похідних від індукованого потоку (в просторі-часі розмірності  $3+1$ ) мають точки розриву при певних значеннях товщини трубки. При недодатних значеннях параметра граничної умови  $\theta$  поведінка індукованого магнітного потоку виявилася подібною до випадків граничної умови типу Діріхле та Неймана. В підрозділі 3.4 досліджується випадок масивного ферміонного поля в кінчному просторі-часі розмірністю  $2+1$  в присутності «магнітної» космічної струни. В цьому випадку виявляється неможливим накласти граничну умову схожу на граничну умову типу Діріхле або Неймана, однак з вимоги самоспряженого розширення оператора гамільтоніана Дірака можна накласти обмеження на розв'язки польових функцій, що залежитиме від одного параметру  $0 < \theta < \pi$ . Розрахунки показали, що індукований в цьому випадку магнітний потік матиме нескінченне значення для всіх значень



параметра  $\theta$  окрім двох значень  $\theta=0, \pi$ . З цих двох значень фізичним буде лише значення параметра самоспряженого розширення  $\theta=0$ , оскільки саме при ньому індукований у вакуумі магнітний потік буде спадати зі збільшенням товщини трубки.

**Серед найбільш цікавих і важливих результатів отриманих у дисертації, на мій погляд, можна відзначити такі:**

- Автором встановлені домінуючі канали народження та розпаду масивних скалярів для умов експериментів DUNE (Fermilab), SHiP (SPS CERN) та експериментів на LHC. Крім того, встановлено, що в експерименті DUNE домінуючим каналом народження скалярів є процес глибоконепружнього розсіяння нуклонів, а в експерименті SHiP та експериментах на LHC домінуючим каналом народження скалярів є розпад мезонів.
- Автору вдалося зробити оцінку похибки в розрахунках області чутливості експерименту SHiP, пов'язаної з використанням для опису народження правокільних масивних нейтрино в тричастинкових розпадах мезонів спрощених матричних елементів, що використовуються в програмі моделювання процесів зіткнення частинок при високих енергіях PUTHIA, в порівнянні з використанням коректних матричних елементів. Автором запропоновано вибір спрощених матричних елементів, доступних в PUTHIA, для підвищення точності подібних розрахунків
- Важливим здобутим результатом є встановлення того факту, що поляризаційні ефекти у вакуумі будуть суттєвими лише у випадку, коли маса квантованого поля матерії є значно меншою за масу гігсівського поля, що призводить до спонтанного порушення симетрії і виникнення топологічного об'єкту у вигляді "магнітної" космічної струни. Іншими словами, космічна струна, що була сформована на масштабах теорії Великого об'єднання, буде поляризувати вакуум сучасних полів матерії, але не зможе впливати на вакуум полів з масою порядку масштабу теорії Великого об'єднання.
- Важливим досягненням дисертаційної роботи є те, що за допомогою чисельних методів автор дослідив поведінку індукованого магнітного потоку у вакуумі квантованого масивного зарядженого скалярного поля в присутності "магнітної" космічної струни, що моделюється непроникливою для полів матерії трубкою скінченного радіуса з «магнітним» полем з граничною умовою Робена. Цікавим результатом є також те, що за певних значень параметра граничної умови Робена індукований магнітний потік у



вакуумі квантованого масивного зарядженого скалярного поля в присутності "магнітної" космічної струни має складну поведінку з особливими точками.

- Важливим результатом дисертаційної роботи є те, що за допомогою чисельних методів автор дослідив поведінку індукованого магнітного потоку у вакуумі квантованого масивного ферміонного поля матерії в присутності "магнітної" космічної струни, що моделюється непроникливою для полів матерії трубкою скінченного радіуса з «магнітним» полем. Показано, що звична гранична умова типу Діріхле або Неймана має бути замінена на умову самоспряженого розширення оператора діраковського гамільтоніана. Важливо, що серед всіх можливих значень параметра самоспряженого розширення знайдено єдине значення, за якого індукований магнітний потік є скінченим та спадає при збільшенні товщини трубки з «магнітним» полем.

Таким чином в дисертаційній роботі детально розглянуто питання пошуку проявів частинок фізики за межами СМ в експериментах на прискорювачах та топологічних струноподібних об'єктів, що могли утворитися у ранньому Всесвіті. Здобуто та детально проаналізовано ряд нових результатів. Знайдені результати мають також фундаментальне значення, розкриваючи теоретико-польовий прояв ефекту Казимира-Ааронова-Бома. Достовірність здобутих результатів не викликає сумнівів, оскільки вони були знайдені шляхом застосування добре відомих та апробованих методів дослідження. Водночас, я маю декілька **побажань та зауважень до дисертаційної роботи:**

- У першому розділі дисертації автором були розглянуті всі канали народження масивного векторного бозону (в розширенні СМ зі взаємодією типу Черна-Саймонса) та нового скаляра (в скалярному розширенні СМ) з розпадів  $K$  та  $V$  мезонів. Бажано було б детально проаналізувати також канали народження нових частинок в розпадах інших мезонів.
- У першому розділі дисертації автором були отримано ефективний лагранжیان взаємодії масивного векторного бозону (в розширенні СМ зі взаємодією типу Черна-Саймонса) з нижніми кварками різних ароматів та зазначено про автоматичне знищення розбіжностей при розрахунку петльової діаграми. Однак загальний розгляд перенормовності низькоенергетичного розширення СМ зі взаємодією типу Черна-Саймонса проведено не було. Зокрема не розглянуто питання про позбавлення від



розбіжної частини петльової діаграми у випадку взаємодії бозона Черна-Саймонса з кварками або лептонами однакових ароматів.

- У третьому розділі дисертації автором була досліджена задача індукування магнітного потоку у вакуумі скалярного і ферміонного полів матерії внаслідок присутності "магнітної" космічної струни. Було б цікаво також обчислити значення індукованої топологічним дефектом густини енергії ферміонного поля.
- Я не можу не зазначити, що новий спосіб оформлення дисертації, як цикл робіт, має деякі негативні аспекти. Зокрема, дуже важко визначити цілісність роботи, однаковість стилю подання матеріалу в розділах дисертації. Огляд літератури, на мій погляд, краще бачити як окремий розділ дисертації. Не вимагаю на відповідь здобувача на це зауваження.

Усі вказані зауваження не ставлять під сумнів основні положення, висновки, наукову новизну і практичне значення дисертаційної роботи. Загалом дисертація є завершеною науковою працею, яка вирішує важливе наукове завдання – аналітичне та чисельне дослідження проявів частинок та топологічних струноподібних об'єктів за межами Стандартної моделі. Наведені зауваження не впливають на мою загальну позитивну оцінку роботи.

Результати проведених дисертантом досліджень опубліковано в 10 статтях профільних закордонних виданнів кuartилів Q1 і Q2, відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports, та 2 статтях Українського фізичного журналу (Q3). До закордонних виданнів, в яких опубліковано роботи здобувача, зокрема належать: 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).

Результати досліджень доповідались на українських і міжнародних наукових конференціях (12 тез): Міжнародна конференція молодих вчених та аспірантів "ІЕФ, 2011" (Ужгород, Україна, 2011), Young Scientists Conference Modern Problems of Theoretical Physics (Kyiv, Ukraine, 2011, 2019, 2021), 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).

Дисертаційна робота виконана фаховою українською мовою, 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.

Беручи до уваги достовірність та новизну здобутих результатів, їхню наукову цінність та актуальність теми в цілому, я вважаю, що дисертаційна робота «Пошук проявів частинок та топологічних струноподібних об'єктів за межами Стандартної моделі» 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 сам дисертант, Горкавенко Володимир Миколайович, без сумніву, заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

В.о. директора  
Інституту прикладної фізики  
Національної академії наук України,  
член.-кореспондент НАН України,  
доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник

Р.І. Холодов

Підпис в.о. директора, чл.-кор. НАН України,  
д.ф.-м.н., с.н.с. Холодова Р.І. засвідчую  
учений секретар ІПФ НАН України



Олексій ВОРОШИЛО