

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертацію **Соболя Олександра Олександровича “Генерація калібрувальних полів на стадії космологічної інфляції”**, подану на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика

Магнітні поля присутні на всіх масштабах у Всесвіті: від окремих планет і зір до галактик та їх скупчень. Нещодавні спостереження гамма-променів від далеких блазарів вказують на присутність магнітних полів також і у великих порожнинах (войдах) великомасштабної структури Всесвіту, де матерія, що здатна їх породити, практично відсутня. Цей спостережуваний факт на сьогодні ще не має остаточного пояснення в науковій спільноті. Дискусії викликають як механізми генерації полів, так і стадії еволюції Всесвіту, коли це могло відбуватися. Зокрема, дуже поширеною в літературі є думка про те, що ці поля можуть походити з найдавніших стадій в історії Всесвіту, наприклад, з космологічної інфляції.

Інфляція – це стадія дуже швидкого прискореного розширення Всесвіту в перші частки секунди від його утворення, яка передувала стадії гарячого Великого вибуху. Хоча на сьогодні ще не існує прямих спостережних свідчень на користь існування цієї фази, цю ідею підтримує абсолютна більшість вчених-космологів, адже вона дає елегантне вирішення цілій низці проблем стандартної космологічної моделі, таким як проблеми горизонту, просторової плоскості Всесвіту та первинних монополів і, що найбільш важливо, забезпечує механізм генерації первинних неоднорідностей (збурень) густини енергії, що служать зародками для формування анізотропії реліктового випромінювання та формування великомасштабної структури Всесвіту.

Саме характеристики первинних збурень, згенерованих під час інфляції, дають можливість досліджувати і отримувати обмеження на фізичні процеси, які відбувалися на цій стадії. Зокрема, наявність додаткових полів (наприклад, калібрувальних полів Стандартної моделі фізики елементарних частинок чи її розширень, на необхідність яких вказує низка спостережуваних даних) залишає свої різноманітні відбитки у спектрах первинних скалярних збурень, дає внесок у стохастичний фон первинних гравітаційних хвиль, генерує негауссові кореляції первинних збурень, що можуть бути спостережуваними у майбутньому. Саме тому дуже важливо мати повне розуміння і кількісний опис процесів генерації калібрувальних полів на інфляційній стадії, а також мати можливість поєднати теоретичні передбачення з ключовими космологічними спостереженнями.

Ще одним важливим явищем, яке супроводжує генерацію калібрувальних полів, є народження з фізичного вакууму пар заряджених частинок і античастинок, або ефект Швінгера. Це явище було передбачене для релятивістських електронів у сильному електричному полі ще в 30-х роках минулого століття, але дотепер ще не спостерігалось в лабораторії через надзвичайно велике значення електричного поля, потрібного для його перебігу (порядку 10^{18} В/м). Такі сильні електричні поля теоретично можуть досягатися в астрофізиці (поблизу магнетарів чи заряджених чорних дір) та космології (зокрема, в

моделях інфляційної генерації електромагнітних полів). Наявність заряджених частинок дуже сильно впливає на еволюцію породжуючого електричного поля. Тому для отримання достовірних передбачень величини згенерованих полів треба самоузгоджено враховувати вплив ефекту Швінгера у процесі генерації.

Всі наведені вище виклики для теоретичного опису генерації калібрувальних полів під час інфляції обумовлюють актуальність дисертаційного дослідження Олександра Олександровича Соболя. У дисертації “Генерація калібрувальних полів на стадії космологічної інфляції” проведено ґрунтовне теоретичне дослідження різноманітних фізичних аспектів інфляційного магнітогенезу, що включають побудову моделей генерації калібрувальних полів, урахування зворотної реакції утворених полів на фонову інфляційну динаміку, опис швінгерівського народження заряджених частинок та його впливу на магнітогенез, генерацію первинних збурень у присутності калібрувальних полів та деякі особливості еволюції магнітних полів зі стадії інфляції дотепер.

Дослідження, що лежать в основі дисертації Олександра Соболя, проводилися у 2017 – 2024 роках на кафедрі квантової теорії поля та космомікрофізики Київського національного університету імені Тараса Шевченка у рамках держбюджетних тем №16БФ051-05 (ДР №0116U002562) «Дослідження фундаментальних проблем фізики ядра, елементарних частинок та космомікрофізики», №19БФ051-06 (ДР №0119U100335) «Топологічні властивості кіральної матерії та бозе-айнштайнівських конденсатів у магнітному полі», №22БФ051-06 (ДР №0122U001957) «Фундаментальні закони фізики в космології раннього Всесвіту», а також у ході виконання проєкту Національного фонду досліджень України № 2020.02/0060 (ДР № 0120U105439) «Генерація і еволюція первинних магнітних полів».

Дисертаційна робота оформлена у вигляді наукової доповіді за сукупністю опублікованих праць здобувача і повністю відповідає вимогам, визначеним МОН України до оформлення докторських дисертацій. Рукопис дисертації становить 116 сторінок і складається з анотації, вступу, опису результатів досліджень та їх обговорення, висновків, списку використаних джерел, що містить 165 найменувань, та одного обов’язкового додатка, де наведено перелік публікацій, що лежать в основі дисертації. Ще 409 сторінок становлять копії наукових праць дисертанта, що тематично згруповані у 6 розділів. Таким чином, повний обсяг роботи становить 525 сторінок і повністю відповідає вимогам МОН.

У *вступі* обґрунтовано актуальність обраної теми дослідження, наведено короткий огляд літератури, вказано на зв’язок роботи з науковими програмами і темами, до яких був залучений дисертант, окреслено мету, завдання, об’єкт та предмет дисертаційного дослідження, перераховано найважливіші отримані результати, які складають новизну роботи, а також їх теоретичне та практичне значення, зазначено кількісні та якісні характеристики публікацій, що лежать в основі дисертації та особистий внесок здобувача до них.

Перший розділ присвячено опису генерації калібрувальних полів під час космологічної інфляції в моделі кінетичного зв’язку, де абелеве калібрувальне поле взаємодіє зі скалярним полем інфлатоном через модифікований кінетичний доданок. Спочатку проведено лінійний аналіз системи шляхом розгляду еволюції окремих мод в

імпульсному просторі. Для врахування нелінійних ефектів, таких як зворотна реакція та ефект Швінгера, запропоновано новий підхід – формалізм градієнтного розкладу, що зводиться до системи зв'язаних звичайних диференціальних рівнянь для середніх значень скалярних добутків векторів електричного та магнітного поля. За допомогою цього підходу визначено особливості, характерні для еволюції калібрувального поля у присутності зворотної реакції. Зокрема, показано, що інфляція триває довше, а інфлатон скочується повільніше, ніж це було б за відсутності зворотної реакції. Однак візитівкою цього режиму є осциляційна поведінка інфлатона і згенерованого поля, що потенційно може мати спостережувані прояви.

У *другому розділі* проведено аналіз інфляційної генерації калібрувальних полів у моделі аксіального зв'язку. Зокрема, було запропоновано метод градієнтного розкладу для цієї моделі і досліджено за допомогою нього перебіг процесу магнітогенезу в режимі сильної зворотної реакції. Встановлено, що розв'язок, відомий у літературі як розв'язок Анбера-Сорбо для інфлатона, в якому градієнт потенціалу інфлатона скомпенсований тертям з боку утворених калібрувальних полів, є нестійким і будь-які малі відхилення від нього швидко нарастають у часі. Загалом, часова поведінка інфлатона і згенерованих полів є коливною, а характерний період коливань визначається затримкою відгуку калібрувального поля на зміни швидкості інфлатона.

Третій розділ присвячено аналізу генерації калібрувальних полів у моделях з немінімальним зв'язком зі скалярною кривиною простору-часу Річчі. Для моделей інфляції Хіггса та Хіггса-Старобінського було проведено лінійний аналіз генерації калібрувальних полів і показано, що проста степенева форма функції немінімального зв'язку може, в залежності від значення параметрів, привести до генерації калібрувальних полів як із синім спектром, так і з масштабно-інваріантним чи навіть червоним спектром, що є перспективним для генерації полів з великою кореляційною довжиною. Разом з тим, на прикладі модифікованої моделі Старобінського було продемонстровано, що для полів з червоним спектром неодмінно виникає зворотна реакція, яка суттєво перебудовує спектр і надає йому синього нахилу. Розраховано сучасне значення магнітного поля і кореляційної довжини, які можуть сягати 10^{-15} Гс та 10 парсек, відповідно.

У *четвертому розділі* розглянуто різні підходи до опису ефекту Швінгера у моделях інфляції з калібрувальними полями. Зокрема у випадку омичного наближення для струму народжених частинок було отримано вирази для ефективних електричної та магнітної провідностей у неколінеарних електричному і магнітному полях. Також запропоновано кінетичний підхід до опису процесу народження частинок, який дозволяє врахувати динаміку заряджених частинок на рівних правах з іншими компонентами: інфлатоном і калібрувальними полями. Такий самоузгоджений опис виявляє багату феноменологію ефекту Швінгера у нестационарному полі, що включає осциляційну поведінку струму і електричного поля як наслідок запізнення відгуку зарядженої компоненти на зміни електричного поля.

У *п'ятому розділі* проаналізовано процеси утворення і врівноваження асиметрії між правими і лівими ферміонами у гарячій плазмі раннього Всесвіту. Зокрема, було показано, що в моделі аксіонної інфляції з псевдоскалярним інфлатоном, який взаємодіє з

калібрувальним полем через доданок типу Черна-Саймонса, швінгерівське народження заряджених ферміонів супроводжується їх нерівномірним розподілом за кіральними станами, так що наприкінці інфляції може бути накопичена значна кіральна асиметрія, аж до 25% від повного числа частинок. Також розраховано темп процесів з переворотом кіральності за рахунок ненульової маси електрона і показано, що він значно перевищує наївні оцінки, що існували в літературі дотепер.

Шостий розділ присвячено генерації первинних скалярних збурень під час інфляції за присутності калібрувальних полів. Було розвинено загальний формалізм, який враховує всі можливі внески до скалярного збурення кривини у першому пертурбативному порядку. Зокрема, було взято до уваги внесок від калібрувального поля, який ніким ніколи не був врахований у попередніх дослідженнях. Запропонований формалізм дозволяє розрахувати спектр дво- і триточкової кореляційної функції скалярних збурень навіть за наявності зворотної реакції калібрувальних полів на фонову динаміку.

У висновках підбито підсумки досліджень і перераховано найбільш важливі отримані результати.

У дисертаційній роботі Олександра Соболя було отримано цілу низку нових, важливих і цікавих результатів, серед яких, як на мене, варто особливо відзначити наступні:

1. Запропоновано і застосовано до цілої низки моделей магнітогенезу новітній метод опису динаміки калібрувальних полів під час інфляції – формалізм градієнтного розкладу. Цей інструмент є незамінним для опису нелінійної поведінки калібрувальних полів за наявності їх зворотного впливу на фонову еволюцію під час інфляції та у присутності швінгерівського народження заряджених частинок.
2. Встановлено загальні закономірності перебігу режиму сильної зворотної реакції, які є універсальними для всіх моделей інфляційного магнітогенезу. Вони включають збільшення тривалості інфляційної фази, сповільнення скочування інфлатона та коливну поведінку згенерованих полів, що є проявом запізнення відгуку калібрувального поля на зміни швидкості інфлатона.
3. Уперше застосовано як кінетичний, так і гідродинамічний підходи до опису ефекту Швінгера у моделях інфляційного магнітогенезу і показано, що динаміка народжених заряджених скалярних частинок є значно багатшою, ніж це передбачає стандартний підхід на основі узагальненого закону Ома. Зокрема, вперше виявлено що через інерційні властивості носіїв заряду виникає запізнення відгуку електричного струму на зміни електричного поля, що призводить до загасаючих осциляцій обох величин.
4. Проведено розрахунок темпу врівноваження кіральної асиметрії у гарячій плазмі за рахунок ненульової маси електрона і показано, що він є величиною першого порядку за сталою тонкої структури, а його чисельне значення на 3 порядки перевищує оцінки, які використовувалися в літературі протягом десяти років до цього.

5. Запропоновано і розроблено самоузгоджений загальний формалізм для розрахунку спектру та негауссовості первинних скалярних збурень кривини, індукованих наявністю абелевих калібрувальних полів під час інфляції. Цей формалізм враховує модифікацію вакуумного спектру за рахунок зворотної реакції калібрувальних полів на інфляційний фон, а також дає можливість обчислити індуковані внески, що походять з тензора енергії-імпульсу самого калібрувального поля.

Результати дисертації О.О. Соболя є новими, оригінальними, обґрунтованими; вони опубліковані у 18 наукових статтях у рецензованих фахових виданнях, серед яких 17 статей (включно з 1 статтею без співавторів) – у журналах, що належать до кuartилів Q1-Q2, і 1 стаття – у вітчизняному виданні, що належить до кuartиля Q3. Також не викликає сумнівів достатність апробації результатів на 7 міжнародних школах та конференціях (до списку публікацій долучено 3 тези доповідей), а також на декількох семінарах в освітніх та науково-дослідних установах, як в Україні, так і за кордоном. Статті дисертанта мають високий рівень цитованості, їх добре знають у науковій спільноті. Зокрема, згідно даних наукометричної бази Scopus, *h*-індекс дисертанта на сьогодні становить 14, а загальна кількість цитувань його робіт наближається до 500.

Разом з тим, хотів би відзначити і кілька дискусійних запитань та зауважень до змісту дисертації:

1. Кілька робіт дисертанта стосуються моделі кінетичного зв'язку, де кінетичний доданок калібрувального поля модифікується шляхом домноження на деяку нелінійну функцію від інфлатона. Ця функція породжує нескінченну кількість операторів розмірності більше 4 і робить теорію неперенормовною. По суті, ми маємо справу з ефективною теорією поля, яка працює лише при достатньо низьких енергіях. У зв'язку з цим виникає запитання про ультрафіолетове замикання теорії. Іншими словами, яка перенормовна фундаментальна теорія може дати у низькоенергетичному наближенні такі доданки в лагранжіані? Це питання, на мою думку, є дуже цікавим з фундаментальної точки зору, але воно не достатньо висвітлене в роботах дисертанта.
2. У роботах, що присвячені кінетичному та гідродинамічному опису ефекту Швінгера під час інфляції, розглядається спрощена модель, де присутнє лише електричне поле, а впливом магнітного поля знехтувано. Разом з тим, основну цікавість з точки зору порівняння зі спостереженнями становлять якраз магнітні поля. Врахування наявності магнітного поля значно збагатить динаміку заряджених частинок і зробить розрахунок більш складним, тому це питання вимагає окремого дослідження. Але все ж, на мою думку, варто було б додати хоча б якісне обговорення цього питання у роботах дисертанта.
3. У роботі про розрахунок спектру первинних скалярних збурень, що генеруються під час інфляції у присутності калібрувальних полів, аналіз проведено у першому порядку теорії збурень. Разом з тим, калібрувальні поля є достатньо сильними, щоб чинити зворотну реакцію на інфляційну динаміку. Тому виникає питання, чи

достатньою є точність результатів, отриманих у першому порядку, і чи справді внески вищих порядків теорії збурень є малими. Повний розрахунок величин у другому і вищих порядках, очевидно, є дуже громіздким і виходить за межі проведеного дослідження. Але все ж було б цікаво оцінити хоча б за порядком величини внески вищих пертурбативних доданків, щоб розуміти межі застосовності отриманих результатів.

Перераховані вище зауваження не змінюють загального позитивного враження від дисертації та не спростовують жодних результатів та висновків проведеного дослідження. Їх слід розглядати як побажання до подальшої роботи дисертанта у цій галузі. Сама ж дисертація (наукова доповідь) Олександра Соболя «Генерація калібрувальних полів на стадії космологічної інфляції» є завершеним науковим дослідженням.

Дисертаційна робота виконана на високому науковому рівні, стосується важливих і актуальних проблем теоретичної фізики. Результати є оригінальними, достовірними і роблять вагомий внесок у розуміння процесів генерації абелевих калібрувальних полів у ранньому Всесвіті. Дисертант продемонстрував досконале володіння методами сучасної теоретичної фізики, космології та квантової теорії поля.

Дисертація та реферат написані грамотною науковою українською мовою, виклад змісту чітко структурований, оформлення здійснено у повній відповідності з чинними вимогами Міністерства освіти і науки України. Дисертаційне дослідження відповідає паспорту спеціальності 01.04.02 – теоретична фізика.

Враховуючи актуальність теми, фундаментальний характер, новизну, теоретичну та практичну цінність отриманих результатів, я вважаю, що дисертаційна робота “Генерація калібрувальних полів на стадії космологічної інфляції” 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 Соболев Олександр Олександрович безумовно заслуговує на присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук.

Офіційний опонент:

начальник відділу статистичної фізики і квантової теорії поля
Інституту теоретичної фізики ім. О.І. Ахієзера
ННЦ ХФТІ НАН України,
доктор фізико-математичних наук, професор
академік НАН України

Юрій СЛЮСАРЕНКО

Підпис академіка Слюсаренка Ю.В. ЗАСВІДЧУЮ:

тимчасово виконуючий обов'язки директора
Інституту теоретичної фізики ім. О.І. Ахієзера
ННЦ ХФТІ НАН України



Леонід ДАВИДОВ