

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу
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

Сучасна космологія стрімко розвивається завдяки неперервному зростанню обсягу та різноманітності даних астрофізичних спостережень, які дають нам все більш детальну інформацію про стан та еволюцію нашого Всесвіту за останні кілька мільярдів років. Однак, як і раніше в історії космології, ключові загадки та невирішені проблеми можуть критися в більш ранніх етапах еволюції нашого Всесвіту.

Важливим елементом нашого Всесвіту є наявність магнітних полів на різних просторових масштабах. Існують свідчення на користь існування таких полів навіть у космічних порожнечах. Проблема походження цих полів досі не вирішена і, ймовірно, потребує звернення до найбільш ранніх стадій його еволюції, зокрема, до інфляційної стадії та періоду її завершення.

Теорія космологічної інфляції, сформульована на початку 1980-х років, досі залишається єдиною теорією, яка не лише передбачає, а й переконливо пояснює походження початкових умов, необхідних для формування спостережуваної великомасштабної структури Всесвіту. У цьому контексті природно виникла ідея пов'язати інфляційні процеси з генерацією первинних магнітних полів. У цьому напрямі протягом останніх десятиліть були досягнуті важливі результати, однак теорія інфляційного магнітогенезу залишалася де-що фрагментарною та недостатньо розвиненою.

Дисертаційна робота автора зробила низку суттєвих якісно нових внесків у розвиток цього сценарію та запропонувала більш узгоджену й послідовну теоретичну модель інфляційного магнітогенезу.

Тема дисертаційної роботи Соболя О.О. охоплює коло питань, пов'язаних із теорією генерації первинних абелевих калібрувальних полів у ранньому Всесвіті на інфляційній та пост-інфляційній стадіях. Саме це ви-

значає її **актуальність** та важливість для сучасної теоретичної космології. Автору дисертації вдалося значно просунути в розробці теорії первинного інфляційного і пост-інфляційного магнітогенезу, побудувавши його самозгоджений і досить повний опис з урахуванням усіх ключових фізичних процесів.

Роботи за темою дисертації Соболя О. О. проводилися в рамках досліджень кафедри квантової теорії поля та космофізики Київського національного університету імені Тараса Шевченка: тема № 16БФ051-05 (ДР № 0116U002562) «Дослідження фундаментальних проблем фізики ядра, елементарних частинок та космофізики»; тема № 19БФ051-06 (ДР № 0119U100335) «Топологічні властивості кіральної матерії та бозе-айнштайнівських конденсатів у магнітному полі»; тема № 22БФ051-06 (ДР № 0122U001957) «Фундаментальні закони фізики в космології раннього Всесвіту»; а також в рамках проєкту Національного фонду досліджень України № 2020.02/0060 (ДР № 0120U105439) «Генерація і еволюція первинних магнітних полів».

Дисертаційна робота Соболя О. О. оформлена у вигляді наукової доповіді за сукупністю статей. Її загальний об'єм становить 525 сторінок, з яких 116 сторінок – рукопис наукової доповіді, а 409 сторінок – копії 18 статей, в яких опубліковані результати роботи. Наведемо короткий зміст і основні результати та висновки за окремими розділами дисертації:

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета та завдання дослідження, визначено об'єкт та предмети досліджень, перераховано методи досліджень, висвітлено наукову новизну, цінність отриманих результатів, визначено особистий внесок здобувача та надано відомості про апробацію результатів дисертаційної роботи.

У **описі результатів дослідження та їх обговоренні** подано докладний аналіз результатів, отриманих у кожній з 18 публікацій, що складають підрозділи дисертації.

У **першому розділі** розглядається теорія кінетичного зв'язку калібрувального поля зі скалярним полем інфлатона. Це одна із найперших і найпростіших теорій інфляційного магнітогенезу. Зв'язок інфлатона з калібрувальним полем порушує конформну інваріантність електромагнетизму і забезпе-

чує генерацію магнітного поля на інфляційній стадії.

Порівняно з попередніми численними дослідженнями такої моделі, автором тут запропоновано новий оригінальний метод – формалізм градієнтного розкладу, який оперує білінійними вакуумними середніми калібрувального поля і дозволяє врахувати в самоузгоджений спосіб декілька нелінійних явищ, таких як зворотна реакція згенерованих полів на інфляційну динаміку та народження пар заряджених частинок у сильному електричному полі.

Одним з оригінальних, цікавих та дещо парадоксальних результатів автора полягає у тому, що зворотна реакція електричного поля не зупиняє, а навпаки продовжує інфляційну стадію, сповільнюючи скочування інфлатона. Енергетичний спектр електричного поля, що генерується на цій стадії, стає масштабно інваріантним, а для магнітного поля набуває синього нахилу зі спектральним індексом $n_B \approx 2$. Народження заряджених частинок електричним полем призводить до сильного послаблення калібрувальних полів і до часткового розігріву Всесвіту ще до завершення інфляційної стадії.

У **другому розділі** розглядається теорія аксіального зв'язку калібрувального поля зі скалярним полем інфлатона. Такий зв'язок порушує симетрію просторової парності і приводить до підсилення лише однієї з колових поляризацій калібрувального поля. Завдяки наближеному закону збереження гелікальності це забезпечує більш тривале існування такого поля у гарячому Всесвіті. За допомогою авторського формалізму градієнтного розкладу в дисертації отримано модельно-незалежні оцінки для величини калібрувальних полів, згенерованих в моделі аксіонної інфляції. Щодо сучасного значення первинного великомасштабного магнітного поля, яке можна згенерувати в такій моделі, вони все ж виявляються досить скромними, не перевищуючи 10^{-15} Гс на масштабах порядку 1 парсека.

У моделі магнітогенезу з аксіальним зв'язком автором дисертації виявлено нетривіальну поведінку, яка суттєво відрізняється від запропонованого у 2009 році стаціонарного розв'язку Анбера–Сорбо. А саме, у режимі сильної зворотної реакції швидкість зміни інфлатона та густина енергії згенерованих полів мають коливну поведінку, яка є наслідком запізнення відгуку калібрувального поля на зміни швидкості інфлатона.

Розігрів за рахунок народження заряджених частинок і в цій моделі

спрацьовує ще наприкінці інфляційної стадії, і його, на думку автора, можна розглядати як важливий додатковий сценарій до стандартного сценарію розігріву з розпадом інфлатона.

У **третьому розділі** розглядаються моделі генерації калібрувальних полів з немінимальним лінійним зв'язком з тензором кривини. Лінійність такого зв'язку означає, що моделі характеризуються лише декількома вільними константами. Основні моделі інфляції, що їх розглядає автор – це моделі Гітса та Гітса–Старобінського. Аналіз для таких моделей проводиться у метричній системі Айнштейна, у якій теорія зводиться до раніше розглянутого звичайного зв'язку скалярного поля з калібрувальним полем, але функції зв'язку тут не постулюються, а випливають зі структури немінимального зв'язку з кривиною в метричній системі Йордана. Проте, інваріанти калібрувального поля в метричній системі Айнштейна тоді входять у дію нелінійно, і їх доводиться враховувати лише у лінійному наближенні. Щоб уникнути цієї проблеми, наприкінці розділу автор також розглядає модель із спеціально влаштованим нелінійним зв'язком з інваріантами калібрувального поля у системі Йордана, який приводить до лінійного зв'язку у системі Айнштейна.

Автором встановлено, що за відсутності зворотної реакції ефективна генерація калібрувального поля відбувається лише у випадку аксіально-домінованого зв'язку. Оцінюючи ефективність цього процесу, автор отримує сучасні значення магнітного поля та його кореляційної довжини, які можуть досягати відповідно, 10^{-15} Гс та 10 пк.

У **четвертому розділі** автор досліджує роль і особливості народження пар заряджених частинок і античастинок у сильних калібрувальних полях (ефект Швінгера), що генеруються під час інфляції. Тут автором також застосовується формалізм градієнтного розкладу, який значно спрощує аналіз. У наближенні узагальненого закону Ома для електричного струму автор показує, що ефект Швінгера значно пригнічує генерацію калібрувальних полів.

За розглядом динаміки народження частинок у сильному електричному полі в рамках кінетичного та гідродинамічного підходів виявлено нелокальний у часі характер індукованого струму народжених частинок, пов'язаний з інерційними властивостями носіїв заряду. Це приводить до знакозмінних згасних осциляцій індукованого струму та електричного поля.

П'ятий розділ дисертації розпочинає дотичну тематику – генерацію та врівноваження кіральної асиметрії ферміонів у ранньому Всесвіті. Автор припускає, що заряджені частинки, які продукуються вже під кінець інфляційного генезу калібрувального поля, швидко термалізуються і їх стан характеризується температурою T і кіральним хімічним потенціалом μ_5 .

Автор проводить чисельний аналіз у моделі аксіонної інфляції і показує, що кінцеве залишкове значення відношення μ_5/T в кінці інфляції слабо залежить від параметра зв'язку і має порядок 0.3. Чисельно це відповідає близько 27% кірального дисбалансу в густині ферміонного числа. Автор робить висновок, що аксіонна інфляція є ефективним генератором кіральності ферміонів.

Автор показує, що процеси зміни кіральності для електронів у ультра-релятивістській плазмі пропорційні першому ступеню константі тонкої структури, а не її квадрату, як можна було б очікувати з наївних міркувань. Це зумовлено тим, що матричні елементи для цих процесів мають інфрачервону сингулярність, яка, як показано автором, регуляризується не вакуумною, а тепловою масою електрона. Тому темп реакцій з переверотом кіральності у ранньому Всесвіті виявляється приблизно на три порядки більшим, ніж очікувалося з наївних оцінок у попередній літературі. Це прискорює дисипацію кіральної асиметрії і, як наслідок, значно знижує ефективність підсилення магнітних полів за рахунок кірального магнітного ефекту.

У **шостому розділі** автор досліджує генерацію первинних скалярних збурень під час інфляції у присутності калібрувальних полів. Під час інфляційного магнітогенезу утворюються калібрувальні поля, які, в свою чергу, породжують збурення густини скалярного типу. Ці збурення є статистично незалежними від вакуумних збурень інфлатона і можуть бути негаусовими. Такі властивості можна використовувати для обмеження моделей інфляційного магнітогенезу за даними спостережень.

Проведені автором числові розрахунки для аксіонної інфляції свідчать про те, що в цій моделі ефект від збурень скалярного типу метрики та калібрувальних полів є значним у режимі слабого поля. Отримані автором нові результати демонструють відхилення у спектрі збурень на порядок величини порівняно з наявними оцінками в літературі.

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

- Запропоновано оригінальний універсальний новітній метод для опису генерації калібрувальних полів під час інфляції — формалізм градієнтного розкладу — який дозволяє врахувати в самоузгоджений спосіб зворотну реакцію згенерованих полів на інфляційну динаміку та швінгерівське народження заряджених частинок. Цей метод на сьогодні широко використовується у науковій спільноті і дає змогу спростити отримання числових результатів у ситуаціях, де інші методи стикаються із значними труднощами.
- Вперше в світовій літературі встановлено універсальні, модельно-незалежні закономірності режиму сильної зворотної реакції згенерованих калібрувальних полів на інфляційну динаміку. Серед них — коливна поведінка густини енергії калібрувальних полів та поля інфлатона, подовження інфляційної стадії, генерація спектру калібрувальних полів з ухилом в короткохвильову область.
- При застосуванні кінетичного та гідродинамічного підходів до опису динаміки ефекту Швінгера автором вперше виявлено якісно нову поведінку електричного поля та струму заряджених частинок під час інфляції та розігріву. Ці величини здійснюють знакозмінні згасні коливання внаслідок запізнення реакції індукованого струму на зміни електричного поля через інерційні властивості носіїв заряду.
- Розраховано уточнену швидкість процесу перевороту кіральності через скінченну масу частинок у гарячій ультра-релятивістській електронно-позитронній плазмі у ранньому Всесвіті. Вперше показано, що ця швидкість є величиною першого порядку (а не квадратичною) за константою тонкої структури і на три порядки величини перевищує наївну оцінку, яка протягом довгого часу використовувалася в літературі. На мій погляд, це один із найцікавіших результатів дисертації, який має загальну цінність, оскільки спирається лише на звичайну квантову електродинаміку.

- Вперше в світовій літературі отримано рівняння, що описує збурення скалярного типу під час інфляції у присутності калібрувальних полів. Це рівняння враховує вплив калібрувального поля як на фонову динаміку, так і на еволюцію скалярних збурень через джерело, яке є квадратичним за операторами калібрувального поля, і призводить до негаузовості збурень кривини. Отримано загальні вирази для спектрів двота триточної кореляційних функцій збурень скалярного типу. Передбачувані властивості збурень скалярного типу можна використовувати для подальшого обмеження моделей інфляційного магнітогенезу за даними спостережень.

Представлені в дисертації результати фундаментального характеру є важливими для кількісного і якісного опису генерації та еволюції калібрувальних полів в інфляційних моделях. Вони мають велику цінність не лише для космології раннього Всесвіту, а й для квантової теорії поля за скінчених температур. Достовірність отриманих результатів не викликає сумнівів, оскільки вони отримані шляхом застосування добре обґрунтованих та апробованих методів дослідження. Дисертаційна робота виконана на високому науковому рівні, тож до неї можна висловити лише окремі незначні зауваження:

1. Було б доречно включити до тексту дисертації узагальнювальне обговорення того, чи вдається пояснити походження спостережуваного магнітного поля у Всесвіті в межах моделей інфляційного магнітогенезу в цілому (такі коментарі наведено для окремих моделей). Якщо ж цього зробити не вдається, варто окреслити, яка обставина є головною перешкодою — сильна зворотна реакція, швінгерівське народження частинок чи інші чинники.
2. Нелінійний зв'язок калібрувального поля зі скаляром кривини, заданий формулою (21) у рефераті, мотивований тим, що у метричній системі Айнштейна він перетворюється на лінійний за інваріантами $F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}$ та $F_{\mu\nu}\tilde{F}^{\mu\nu}$ зв'язок у (22). За певних значень величин цих інваріантів знаменник при члені з R^2 у (21) обернеться в нуль. Хоча у статті [14] зауважено, що подібне не відбувається під час інфляційного магнітогенезу,

виникає цікаве запитання: що означає така умова для запропонованої моделі в системі Айнштейна?

Великі від'ємні значення інваріантів $F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}$ та $F_{\mu\nu}\tilde{F}^{\mu\nu}$, які призводять до обернення в нуль і далі – до зміни знака знаменника при члені з R^2 у лагранжіані (21), ймовірно, впливають на ефективний потенціал скалярона у лагранжіані (22), змінюючи його знак і роблячи його нестійким. Доцільно було б здійснити відповідний аналіз саме в наочній системі Айнштейна, в якій і працює автор.

3. У дисертації та рефераті автор перекладає англomовний термін “Einstein frame” як “айнштайнівська система відліку”. На мій погляд, таке тлумачення є не зовсім коректним, оскільки термін “система відліку” у загальній теорії відносності має усталене значення й практично збігається за змістом із терміном “система координат”. Сам автор використовує цей термін саме в такому, традиційному значенні, зокрема, при описі електричного та магнітного полів, а також швінгерівського струму.

Відтак, аби уникнути термінологічної плутанини, доцільніше було б використовувати інший варіант перекладу “Einstein frame”, наприклад: “айнштайнівська система (полів)”, “(метрична або польова) система Айнштейна” тощо.

Висловлені зауваження жодним чином не ставлять під сумнів достовірність ключових результатів дослідження й обґрунтованість відповідних висновків, а також не знижують загальної високої оцінки роботи.

Результати дисертаційної роботи опубліковано в 17 статтях профільних закордонних видань Physical Review Letters (Q1), Physical Review D (Q1) та Journal of High Energy Physics (Q2) кuartилів Q1 і Q2 за класифікацією Scopus та Scimago Journal and Country Rank, та у 1 статті в Українському фізичному журналі (Q3).

Результати дисертаційної роботи апробовано на українських та міжнародних наукових конференціях (3 тези включено в дисертацію): Віртуальна конференція “Zooming in on Axions in the Early Universe” (22–26 червня

2020 р., ЦЕРН, Швейцарія); 25-та міжнародна конференція “From the Planck Scale to the Electroweak Scale (PLANCK 2023)” (22–26 травня 2023 р., Варшава, Польща); 4-й щорічний симпозіум EuCAPT (14–16 травня 2024 р., ЦЕРН, Швейцарія), а також на інших міжнародних і вітчизняних конференціях та наукових семінарах.

Дисертаційна робота виконана фаховою українською мовою, подання матеріалу відповідає стилю науково-дослідної літератури. Реферат 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 «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 безперечно заслуговує на присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук.

29 липня 2025 р.

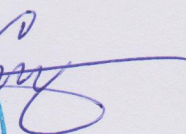
Завідувач відділу астрофізики та елементарних частинок
Інституту теоретичної фізики
ім. М. М. Боголюбова НАН України,
доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник



Юрій ШТАНОВ

“Підпис доктора фізико-математичних наук Юрія Штанова засвідчую”

Вчений секретар Інституту теоретичної фізики
ім. М. М. Боголюбова НАН України,
кандидат фізико-математичних наук



Іван СТАРОДУБ