

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

Дисертаційна робота Олександра Соболя присвячена всесторонньому вивченню генерації калібрувальних полів на ранній інфляційній стадії еволюції Всесвіту. Інфляційна стадія є ключовим етапом еволюції Всесвіту, на якому формуються його загальні властивості та генеруються флуктуації метрики простору-часу, визначальні за формування його структури від галактик до Космічної павутини. У найпростіших моделях інфляції такі флуктуації є гаусівськими, що добре узгоджується з характеристиками кутових флуктуацій температури і поляризації реліктового випромінювання та просторових неоднорідностей галактик, отриманих у численних спостережних програмах. Складніші моделі допускають різного рівня відхилення від гаусівського розподілу, а їх можливе виявлення телескопами наступного покоління відкриє нове вікно можливостей для вивчення фізичних процесів під час інфляції.

Ще однією важливою спостережною властивістю нашого Всесвіту є наявність магнітних полів на всіх масштабах — від планетарних до космологічних. Нещодавно отримані докази слабких магнітних полів у порожнинах (войдах) великомасштабної структури Всесвіту вказують на їх ймовірне космологічне походження — генерацію на ранніх етапах еволюції Всесвіту, в процесі інфляції чи баріосинтезу. Тому природним є вивчення генерації не лише магнітних полів, але й інших калібрувальних полів фундаментальних фізичних взаємодій. Розв'язанню широкого кола актуальних проблем цього напрямку і присвячена дисертаційна робота Олександра Соболя.

Загальною метою дисертації є дослідження взаємного впливу згенерованих на інфляційній фазі еволюції Всесвіту абелевих калібрувальних полів та поля інфлатона на їх еволюцію, динаміку та характеристики первинних скалярних збурень метрики простору-часу та полів. Для її досягнення розв'язано низку задач, щодо яких можна сказати вперше:

- розроблено теоретичний метод генерації калібрувальних полів під час інфляції в нелінійному режимі еволюції, що включає зворотну реакцію згенерованих полів на фонову інфляційну динаміку;
- встановлено характерні риси режиму зворотної реакції у моделях з кінетичним та аксіальним зв'язками калібрувального поля з інфлатоном;
- кількісно описано генерацію калібрувальних полів з немінимальним зв'язком з кривиною простору-часу у моделях інфляції Старобінського, Гітса та змішаній інфляції Гітса-Старобінського;
- враховано вплив часової залежності калібрувальних полів на динаміку швінгерівського народження пар заряджених частинок та античастинок у рамках кінетичного та гідродинамічного підходів;

- побудовано теорію ефекту Швінгера у Всесвіті, що розширюється, з перших принципів на основі квантових кінетичних рівнянь;
- оцінено ефективність генерації кіральної асиметрії ферміонної плазми, утвореної внаслідок ефекту Швінгера у гелікальному калібрувальному полі;
- обчислено темп урівноваження кіральної асиметрії в гарячій плазмі за рахунок процесів з переворотом кіральності;
- розраховано спектральні характеристики первинних скалярних збурень, згенерованих під час інфляції у присутності калібрувальних полів.

Дисертація оформлена у вигляді наукової доповіді за сукупністю наукових статей за науковою тематикою згідно вимог МОН України і складається з анотації, вступу, опису результатів досліджень та їх обговорення, 6 розділів з копіями статей, висновків, списку використаних джерел, що містить 165 найменувань, та одного додатка. Загальний об'єм дисертації 525 сторінок, з яких 116 сторінок становить рукопис наукової доповіді, а 409 сторінок – копії наукових праць, в яких опубліковані результати роботи.

У вступі коротко висвітлено стан наукової проблеми, сформульовано мету роботи та основні завдання, представлено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, надано інформацію про зв'язок роботи з науковими темами, інформацію про апробацію результатів дисертації, вказано кількість публікацій та особистий внесок у них здобувача.

У першому розділі детально досліджено взаємодію калібрувального поля зі скалярним полем інфлатона у моделі кінетичного зв'язку і описано генерацію калібрувального поля в імпульсному просторі. Також було запропоновано новий метод для опису – формалізм градієнтного розкладу, що дозволяє самоузгоджено врахувати нелінійні ефекти, що супроводжують процеси генерації абелевих калібрувальних полів.

Другий розділ присвячено магнітогенезу в моделі аксіального зв'язку калібрувального поля з інфлатоном. Було отримано модельно-незалежні оцінки для величини калібрувальних полів, згенерованих у моделі аксіонної інфляції, і розраховано сучасні значення характеристик магнітного поля у войдах, яке може бути згенероване в моделі аксіального зв'язку.

У третьому розділі проаналізовано можливості генерації калібрувальних полів у моделях з немінимальним зв'язком з гравітацією і отримано явні вирази для функцій кінетичного і аксіального зв'язку калібрувального поля з інфлатоном в системі відліку Айнштейна. Було описано генерацію калібрувальних полів у лінійному режимі за відсутності зворотної реакції. Показано що у модифікованій моделі Старобінського потенційно можуть бути згенеровані калібрувальні поля зі спектром, що є масштабно-інваріантним або навіть має червоний ухил.

Четвертий розділ присвячено виявленню особливостей швінгерівського народження пар заряджених частинок і античастинок у сильних калібрувальних полях під час інфляції. З перших принципів виведено систему квантових кінетичних рівнянь, що описують народження скалярних частинок сильним електричним полем у ранньому Всесвіті. За допомогою кінетичного та гідродинамічного підходів розглянуто динаміку швінгерівського народження частинок у сильному

електричному полі і виявлено нелокальний у часі характер індукованого струму народжених частинок, що пов'язаний з інерційними властивостями носіїв заряду.

П'ятий розділ присвячено опису генерації та врівноваження кіральної асиметрії ферміонів у ранньому Всесвіті. Показано, що темп реакцій з перевертанням кіральності є величиною першого порядку за сталою тонкої структури, а тому його чисельне значення у ранньому Всесвіті приблизно на три порядки більше, ніж очікувалося з простих оцінок.

У шостому розділі досліджено генерацію первинних скалярних збурень під час інфляції у присутності калібрувальних полів. Отримано диференціальне рівняння для еволюції збурення кривини, яке враховує вплив калібрувального поля як на фонову динаміку, так і на еволюцію скалярних збурень через джерела, які призводять до негаусовості збурень кривини і отримано відповідні загальні вирази для спектрів дво- і триточкової кореляційних функцій первинних збурень.

Серед одержаних у дисертації результатів найбільшу наукову цінність, на мою думку, мають наступні:

- Формалізм градієнтного розкладу – новітній метод для опису генерації калібрувальних полів під час інфляції, розроблений у ряді статей автора дисертації, що дозволяє самоузгоджено врахувати зворотну реакцію згенерованих полів на інфляційну динаміку та швінгерівське народження заряджених частинок.

- Самоузгоджений опис магнітогенезу в моделі псевдоскалярної інфляції з аксіальним зв'язком калібрувального поля з інфлатоном з урахуванням явища інверсного каскаду магнітної спіральності у постінфляційній еволюції магнітного поля та параметри магнітних полів, що можуть бути згенеровані в рамках таких моделей.

- Узагальнення опису ефекту Швінгера на випадок змінного зовнішнього калібрувального поля і нестационарної метрики.

- Розширення інфляційної моделі Старобінського шляхом додавання немінимального зв'язку абелевих калібрувальних полів зі скалярною кривиною простору-часу з непертурбативним врахуванням впливу зворотної реакції на динаміку такої системи.

- Узагальнення рівняння Муханова-Сасакі на випадок еволюції первинних скалярних збурень кривини під час інфляції у присутності абелевих калібрувальних полів та загальні вирази для спектрів дво- та триточкової кореляційних функцій скалярних збурень.

Усі результати, представлені в дисертації, отримані вперше, апробовані у доповідях на численних наукових семінарах та конференціях. Їх достовірність забезпечена застосуванням добре апробованих методів дослідження, порівнянням з деякими відомими в літературі граничними випадками та підтверджена публікаціями у рецензованих наукових журналах кuartилів Q1-Q3.

Водночас, є кілька зауважень до дисертаційної роботи:

- 1 Як відомо, питання появи магнітних полів у планет, зір і галактик досі є актуальною задачею астрофізики. Чи можуть космологічні первинні поля, згенеровані на інфляційній стадії, бути першопричиною появи полів на астрофізичних масштабах в процесі формування елементів великомасштабної структури Всесвіту? Питання є за межами дисертаційного дослідження, але згадка

про такі роботи в оглядовій частині підсилили б важливість отриманих результатів.

- 2 В аналізі генерації первинних магнітних полів в описовій частині тексту дисертації не уточнено, про які поля йде мова: гелікальні (спіральні) чи негелікальні (в авторефераті та в статтях дисертації це вказано). Не згадано також про те, які механізми загасання первинного магнітного поля, крім адіабатичного, враховано при перерахунку величини поля на сучасну епоху.
- 3 Автор у своїх дослідженнях сконцентрував увагу на всебічному аналізі генерації абелевих калібрувальних полів у ранньому Всесвіті. Чи піддаються розвинуті підходи узагальненню на неабелеві калібрувальні поля, присутні у значній частині бозонного сектору Стандартної Моделі фізики елементарних частинок? Відповіді, на жаль, у дисертації я не знайшов.
- 4 Існування галактик з надмасивними чорними дірами на великих червоних зміщеннях, виявлених Космічним телескопом імені Джеймса Вебба, є викликом для стандартної Λ CDM моделі. Одним із механізмів, що міг би пояснити існування цих чорних дір, є їх формування у ранньому Всесвіті за рахунок колапсу первинних збурень густини енергії великої амплітуди. Чи проглядаються у розглянутих моделях інфляції з генерацією калібрувальних полів відповідь на цей та інші виклики сучасній космологічній моделі, які повстали в останні роки? Відсутність загальної відповіді у цій дисертації, ймовірно, буде знайдена у наступних роботах автора та дисертаціях його учнів.

Однак, зазначені зауваження не ставлять під сумнів достовірність основних результатів роботи та зроблених на їх основі висновків, та не впливають на загальну дуже позитивну оцінку роботи. Без сумнівів, результати, представлені в дисертації, носять фундаментальний характер і є важливими для кількісного опису калібрувальних абелевих полів в інфляційних моделях та їх еволюції до теперішнього часу. Ці результати розкривають універсальні закономірності перебігу режиму сильної зворотної реакції згенерованих полів, описують складну динаміку народження заряджених частинок, і дозволяють встановити зв'язок між теоретичними розрахунками калібрувальних полів під час інфляції і їх спостережними проявами.

Результати дисертації викладено у 18 наукових статтях у фахових виданнях, що індексуються в міжнародній наукометричній базі даних Scopus: 15 із них опубліковано у закордонних журналах, що належать до квартилю Q1 за Scimago Journal and Country Rank, 2 статті – до квартилю Q2 і 1 стаття – у фаховому виданні України, що належить до квартилю Q3. Також матеріали роботи опубліковано у 3 працях конференцій.

Дисертація написана фаховою українською мовою, текстове подання матеріалу відповідає стилю науково-дослідної літератури. Реферат оформлено і викладено з урахуванням відповідних вимог і відображає зміст дисертації. Представлене до захисту дисертаційне дослідження відповідає паспорту спеціальності 01.04.02 – теоретична фізика.

Не можу також не відзначити щирості, любові і поваги автора до своєї родини, вчителів, колег і учнів, які виражені в подяках на останній сторінці дисертації.

Доєднуюсь до тих подяк усім, хто долучився до формування Олександра як Людини, Вченого і Вчителя.

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 йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук.

Офіційний опонент:

Директор Астрономічної обсерваторії
Львівського національного університету
імені Івана Франка
член-кореспондент НАН України,
доктор фізико-математичних наук,
професор



Богдан НОВОСЯДЛИЙ

