

РІШЕННЯ

щодо присудження наукового ступеня доктора наук

Спеціалізована вчена рада з присудження наукового ступеня доктора наук

Д 26.191.01 Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова

(шифр докторської ради, повне найменування закладу вищої освіти (наукової установи),

Національної академії наук України

прийняла рішення

підпорядкування (у родовому відмінку)

про присудження наукового ступеня доктора

фізико-математичних

наук

(галузь науки)

Соболю Олександрові Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові (за наявності) здобувача у давальному відмінку)

на підставі прилюдного захисту докторської дисертації

«Генерація калібрувальних полів на стадії космологічної інфляції»

(назва докторської дисертації)

у вигляді

наукової доповіді

*/ з грифом (при необхідності)

(на правах рукопису, опублікованої монографії, наукової доповіді)/

(таємно, для службового користування)

за спеціальністю

01.04.02 теоретична фізика

(шифр і назва наукової спеціальності за чинним переліком)

«04» вересня 2025 року, протокол № 4 .

Соболь Олександр Олександрович

1991 року народження,

(прізвище, ім'я, по батькові (за наявності) здобувача)

громадянин

України

(вказується назва держави, громадянином якої є здобувач)

освіта вища: закінчив у 2015 році Київський національний університет імені Тараса Шевченка

(найменування закладу вищої освіти)

за спеціальністю

фізика ядра та фізика високих енергій

(за дипломом)

Наукові ступені і вчені звання (перелічуються у порядку їх присудження чи присвоєння за наявності):

кандидат фізико-математичних наук з 2018 року.

Перебуває в докторантурі Київського національного університету імені Тараса Шевченка Міністерства освіти і науки України, м. Київ з «15» жовтня 2023 року до теперішнього часу.

Докторська дисертація виконана на кафедрі квантової теорії поля та космофізики

(назва підрозділу,

фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

найменування закладу вищої освіти, наукової установи)

Науковий консультант – Вільчинський Станіслав Йосипович, доктор фізико-математичних

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь,

наук, професор, завідувач кафедри квантової теорії поля та космофізики Київського

вчене звання, місце роботи, посада)

національного університету імені Тараса Шевченка Міністерства освіти і науки України.

Рекомендовано до захисту «05» травня 2025 року.

Здобувач має 21 наукову публікацію за темою дисертації, з них 18 статей в наукових фахових виданнях, 3 матеріалів та тез конференцій.

Опоненти:

Слюсаренко Юрій Вікторович, доктор фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 теоретична фізика, професор кафедри штучного інтелекту та інтерактивних систем, академік НАН України за спеціальністю ядерна фізика, Інститут теоретичної фізики ім. О.І. Ахієзера Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» Національної академії наук України, начальник відділу статистичної фізики і квантової теорії поля дав позитивний відгук із зауваженнями:

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.

Новосядлий Богдан Степанович, доктор фізико-математичних наук за спеціальністю 01.03.02 – астрофізика, радіоастрономія, професор кафедри астрофізики, член-кореспондент НАН України за спеціальністю астрофізика, космологія, Львівський національний університет імені Івана Франка Міністерства освіти і науки України, директор Астрономічної обсерваторії дав позитивний відгук із зауваженнями:

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 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.

Штанов Юрій Володимирович, доктор фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика, старший науковий співробітник за спеціальністю теоретична фізика, Інститут теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова Національної академії наук України, завідувач відділу астрофізики та елементарних частинок дав позитивний відгук із зауваженнями:

1. Було б доречно включити до тексту дисертації узагальнювальне обговорення того, чи вдається пояснити походження магнітного поля у Всесвіті в межах моделей інфляційного магнітогенезу в цілому (таке пояснення 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 авторефераті, мотивований тим, що у метричній системі Айнштейна він перетворюється на лінійний зв'язок (22). За певних значень величин інваріантів $F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}$ та $F_{\mu\nu}\tilde{F}^{\mu\nu}$ знаменник при члені з R^2 у (21) обернеться в нуль. Хоча автор зауважує у статті, що подібне не відбувається під час інфляційного магнітогенезу, виникає цікаве запитання: що це означає 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 знаку знаменника при члені з R^2 у лагранжіані (21), ймовірно, впливають на ефективний потенціал скалярона у лагранжіані (22), роблячи його нестійким. Доцільно було б здійснити відповідний аналіз саме в наочній системі Айнштейна, в якій і працює автор.
3. У дисертації та авторефераті 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.

У дискусії взяли участь члени докторської ради:

1. Лариса БРИЖИК, доктор фіз.-мат. наук за спеціальністю 01.04.02: зауважень немає.
2. Валерій ГУСИНІН, академік НАН України, доктор фіз.-мат. наук за спеціальністю 01.04.02: З історичної точки зору Ви все-таки приписуєте трошки забагато Швінгеру. Це насправді просто народження заряджених частинок. В постійному полі на 20 років раніше Швінгера – це Заутер зробив. У Швінгера, власне, нових формул в цьому плані не було. Він просто вивів коваріантним виглядом ті ж самі формули. Далі, коли ви дивитесь залежність від часу, через 20 років, у 1971 році, це Брезін. Його класична робота про народження частинок у залежному від часу полі. Ви про це не згадували, а приписуєте все Швінгеру. Мені здається, все-таки треба тут віддати належне людям, що зробили конкретні речі.
3. Марк ГОРЕНШТЕЙН, доктор фіз.-мат. наук за спеціальністю 01.04.02: зауважень немає.
4. Микола ІОРГОВ, доктор фіз.-мат. наук за спеціальністю 01.04.02: зауважень немає.
5. Андрій СЕМЕНОВ, доктор наук з галузі «Природничі науки» за спеціальністю 01.04.02: зауважень немає.
6. Ярослав ЗОЛОТАРЮК, доктор фіз.-мат. наук за спеціальністю 01.04.02: зауважень немає.

7. Богдан ЛЕВ, академік НАН України, доктор фіз.-мат. наук за спеціальністю 01.04.02: При описі ефекту Швінгера мова йде про кінетичне або гідродинамічне описання. Я не дуже розумію, чому Ви використовуєте рівняння Больцмана та гідродинаміку в даному випадку. Оскільки це ж можна по всьому спектру пройти, чому Ви не використовуєте рівняння Фоккера-Планка з рівнянням Ланжевена, яке враховує збільшення енергії або зменшення енергії?

та присутні на захисті фахівці

1. Едуард ГОРБАР, член-кореспондент НАН України, доктор фіз.-мат. наук, професор фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка: зауважень немає.

При проведенні таємного голосування виявилось, що із 13 членів докторської ради, які взяли участь у голосуванні (з них 8 докторів наук за профілем дисертації), проголосували:

«За» 13 членів докторської ради,

«Проти» 0 членів докторської ради,

недійсних бюлетенів 0.

Висновок спеціалізованої вченої ради Д 26.191.01 Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова Національної академії наук України про дисертацію Соболя Олександра Олександровича «Генерація калібрувальних полів на стадії космологічної інфляції», представлену на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

Дисертація Соболя О.О. присвячена розв'язанню актуальної наукової проблеми – з'ясуванню походження магнітних полів у Всесвіті та пов'язаним з цим теоретичним та феноменологічним аспектам генерації абелевих калібрувальних полів на інфляційній стадії еволюції Всесвіту.

Дисертація Соболя О.О. виконана на кафедрі квантової теорії поля та космофізики фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка, де він перебуває в докторантурі (науковий консультант – д. ф.-м. н., проф. Вільчинський Станіслав Йосипович, зав. кафедри квантової теорії поля та космофізики). Дослідження проводилися в рамках трьох науково-дослідних робіт по держбюджетних темах (ДР №: 0116U002562, 0119U100335, 0122U001957) та в рамках одного проекту НФДУ (ДР № 0120U105439).

Актуальність теми дисертаційної роботи зумовлена наявністю низки відкритих запитань в описі генерації калібрувальних полів на інфляційній стадії та їх подальшої еволюції до теперішнього часу. Магнітні поля присутні у Всесвіті на всіх масштабах — від планет до космічних войдів, де спостерігаються надзвичайно слабкі поля ($> 10^{-17}$ Гс), що важко пояснити процесами у пізньому Всесвіті. Це свідчить про їхнє первинне походження, зокрема під час інфляції — епохи квазіекспоненційного розширення, яка не лише розв'язує проблеми горизонту й плоскості, а й природно генерує скалярні та тензорні збурення, що формують великомасштабну структуру Всесвіту та стохастичний фон гравітаційних хвиль. Для інфляційного магнітогенезу необхідне порушення конформної симетрії максвеллівської дії, наприклад, через взаємодію калібрувального поля з інфлатоном або кривиною простору-часу. Попередні дослідження зосереджувалися переважно на лінійному режимі еволюції полів, хоча зворотна реакція та ефект Швінгера — народження пар частинок у сильних полях — можуть істотно змінювати динаміку генерації калібрувальних полів. Суттєво нелінійний характер зворотної реакції та народження пар ускладнює моделювання, потребуючи або ітеративних методів, або ґраткових симуляцій. Після інфляції еволюція магнітних полів у плазмі з кіральною асиметрією може супроводжуватися їх підсиленням завдяки кіральному магнітному ефекту, ефективність якого визначається темпом врівноваження кіральної асиметрії. Для електронно-позитронної плазми точний розрахунок цього коефіцієнта раніше не було виконано, хоча він критично важливий для опису постінфляційної динаміки магнітних полів.

Отримані в дисертації результати є новими. Серед найвагоміших результатів, отриманих дисертантом особисто, варто відзначити наступні:

- Розроблено новітній формалізм градієнтного розкладу для моделювання генерації калібрувальних полів під час інфляції з урахуванням зворотної реакції та швінгерівського народження заряджених частинок.
- Встановлено універсальні ознаки режиму сильної зворотної реакції: коливання інфлатона та густини енергії калібрувального поля, подовження інфляційної стадії, уповільнення еволюції інфлатона порівняно з випадком без калібрувального поля, спектр калібрувальних полів, що є зростаючою функцією частоти.
- Оцінено сучасні параметри гелікальних магнітних полів, згенерованих у моделях з аксіальним зв'язком під час інфляції, з урахуванням впливу зворотного каскаду у постінфляційній динаміці: індукція магнітного поля не перевищує 10^{-15} Гс, кореляційна довжина ~ 1 пк.
- Доведено нестійкість розв'язку Анбера–Сорбо в режимі сильної зворотної реакції під час аксіонної інфляції, що виключає його реалізацію в реалістичних моделях.
- Виведено явні вирази для ефективних функцій кінетичного та аксіального зв'язку електромагнітного поля з інфлатоном у моделі гітсівської інфляції з немінімальною взаємодією з кривиною простору-часу і показано, що в сучасну епоху магнітне поле, згенероване в цій моделі, може досягати 10^{-15} Гс при кореляційній довжині близько 10 пк.
- Показано, що в модифікованій моделі Старобінського з немінімальним зв'язком калібрувального поля з кривиною простору-часу зворотна реакція суттєво перебудовує спектр, підсилюючи внески мод із більшими імпульсами та обмежуючи цим довжину когерентності згенерованих магнітних полів.
- Застосовано кінетичний і гідродинамічний підходи до опису динаміки ефекту Швінгера в інфляційних моделях і показано, що струм заряджених частинок та електричне поле виявляють згасні знакозмінні коливання, зумовлені запізненням відгуком струму на зміни електричного поля.
- Отримано квантові кінетичні рівняння для опису швінгерівського народження скалярних частинок у змінному полі у Всесвіті, що розширюється, та перенормовані вирази для енергії, тиску і струму народжених частинок.
- Отримано вираз для швінгерівського струму в неколінеарних електричному та магнітному полях, а також проаналізовано залежність швінгерівського загасання мод калібрувального поля від їх частоти.
- Розраховано швидкість урівноваження кіральної асиметрії за рахунок ненульової маси електрона у гарячій плазмі раннього Всесвіту при температурі порядку 100 MeV і показано, що її значення перевищує існуючі наївні оцінки на 3 порядки.
- Розраховано електропровідність гарячої абелевої плазми зі скалярними та ферміонними носіями заряду в провідному логарифмічному порядку.
- Виведено рівняння еволюції первинних скалярних збурень кривини під час інфляції у присутності калібрувальних полів та отримано спектри дво- і триточкових кореляційних функцій збурень.

Високий науковий рівень, обґрунтованість і достовірність основних наукових положень, висновків роботи та одержаних результатів забезпечені: чітким формулюванням моделей і використаних наближень; застосуванням апробованих методів теоретичної фізики, зокрема квантової теорії поля та космології; порівнянням результатів, отриманих різними підходами, та перевіркою на їх самоузгодженість; відповідністю висновків до відомих частинних випадків та результатів попередніх досліджень у літературі; публікаціями наукових результатів у високореєтингових рецензованих фахових виданнях та їх успішною апробацією на міжнародних наукових конференціях.

Наукове та практичне значення. Представлені у дисертації результати мають фундаментальне значення та становлять вагомий внесок у кількісний опис генерації калібрувальних полів в інфляційних моделях і дослідження їхньої еволюції до сучасної епохи. Отримані результати виявляють універсальні закономірності розвитку режиму сильної зворотної реакції згенерованих полів, відтворюють складну динаміку швінгерівського народження заряджених частинок та пропонують нові аналітичні вирази для кінетичних коефіцієнтів гарячої плазми з кіральною асиметрією. Також встановлено зв'язок між теоретичними оцінками параметрів калібрувальних

полів у період інфляції та їх можливими астрофізичними проявами — зокрема, магнітними полями у войдах та спектром скалярних збурень. Результати дослідження становлять інтерес для космології раннього Всесвіту, квантової теорії поля у Всесвіті, що розширюється, а також для теорії поля при скінченних температурах.

Дисертація оформлена у вигляді наукової доповіді за сукупністю статей. Основний зміст дисертації викладено у 21 науковій роботі: 18 статтях та 3 тезах доповідей на міжнародних конференціях. 18 публікацій індексуються наукометричною базою даних Scopus. Відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank у профільних наукових журналах квартиля Q1 опубліковано 15 статей, квартиля Q2 – 2 статті, квартиля Q3 – 1 стаття. Статті представлено у високореєтингових профільних наукових журналах, таких як Physical Review Letters (Q1), Physical Review D (Q1), Journal of High Energy Physics (Q2), Ukrainian Journal of Physics (Q3).

Матеріали кандидатської дисертації Соболя О.О. «Надкритична нестабільність у графені з зарядженими домішками» (2017 р.) не представлені в результатах і висновках його докторської дисертаційної роботи. У докторській дисертації отримано нові результати у порівнянні з кандидатською. Усі матеріали докторської дисертації є новими та оригінальними.

За своїм змістом дисертація відповідає спеціальності 01.04.02 – теоретична фізика.

Спеціалізована вчена рада Д 26.191.01 вважає, що за рівнем та обсягом проведених наукових досліджень, їхньою актуальністю, науковою новизною, практичною цінністю, рівнем та кількістю публікацій дисертаційна робота «Генерація калібрувальних полів на стадії космологічної інфляції» відповідає всім вимогам п. 7, 8 та 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17.11.2021 року №1197, які висуваються до докторських дисертацій, а її автор, Соболю Олександр Олександрович, заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

На підставі результатів таємного голосування та прийнятого висновку докторська рада присуджує

Соболю Олександрові Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові (за наявності) здобувача у давальному відмінку)

науковий ступінь (наукового ступеня) доктора фізико-математичних наук
(галузь)

за спеціальністю 01.04.02 теоретична фізика
(шифр і назва наукової спеціальності)

Головуючий на засіданні
спеціалізованої вченої ради з
присудження наукового ступеня
доктора наук



Д 26.191.01
(шифр ради)

(підпис)

Богдан ЛЕВ
(власне ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
з присудження наукового
ступеня доктора наук

(підпис)

Ярослав ЗОЛОТАРЮК
(власне ім'я ПРІЗВИЩЕ)

« 8 » вересня 2025 року