Облікова картка дисертації

I. Загальні відомості

Державний обліковий номер: 0525U000321

Особливі позначки: відкрита

Дата реєстрації: 10-07-2025

Статус: Підтверджена МОН

Реквізити наказу МОН / наказу закладу: Наказ МОН України № 1329 від 07.10.2025

II. Відомості про здобувача

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Соболь Олександр Олександрович
2. Oleksandr O. Sobol

Кваліфікація: к. ф.-м. н., 01.04.02

Ідентифікатор ORCID ID: 0000-0002-6300-3079

Вид дисертації: доктор наук

Аспірантура/Докторантура: так

Шифр наукової спеціальності: 01.04.02

Назва наукової спеціальності: Теоретична фізика

Галузь / галузі знань: Не застосовується

Освітньо-наукова програма зі спеціальності: Не застосовується

Дата захисту: 04-09-2025

Спеціальність за освітою: фізика ядра та фізика високих енергій

Місце роботи здобувача: Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Код за ЄДРПОУ: 02070944

Місцезнаходження: вул. Володимирська, буд. 60, Київ, 01033, Україна

Форма власності:

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR: Не застосовується

III. Відомості про організацію, де відбувся захист

Шифр спеціалізованої вченої ради (разової спеціалізованої вченої ради): Д 26.191.01

Повне найменування юридичної особи: Інститут теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова Національної академії наук України

Код за ЄДРПОУ: 05417124

Місцезнаходження: вул. Метрологічна, буд. 14-б, Київ, 03143, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Національна академія наук України

Ідентифікатор ROR:

IV. Відомості про підприємство, установу, організацію, в якій було виконано дисертацію

Повне найменування юридичної особи: Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Код за ЄДРПОУ: 02070944

Місцезнаходження: вул. Володимирська, буд. 60, Київ, 01033, Україна

Форма власності:

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR: Не застосовується

V. Відомості про дисертацію

Мова дисертації: Українська

Коди тематичних рубрик: 29.05.23, 29.05.49, 37.15.25, 41.29.17

Тема дисертації:

1. Генерація калібрувальних полів на стадії космологічної інфляції
2. Gauge field production at the stage of cosmological inflation

Реферат:

1. Дисертацію (наукову доповідь) присвячено теоретичному дослідженню генерації абелевих калібрувальних полів на стадії інфляції у ранньому Всесвіті та різноманітних феноменологічних аспектів цього сценарію: зворотної реакції згенерованих полів на інфляційну динаміку, народження заряджених частинок завдяки ефекту Швінґера, генерації та часової еволюції кіральної асиметрії ферміонів, формування первинних скалярних збурень тощо. У першому розділі розглянуто взаємодію калібрувального поля зі скалярним полем інфлатоном у моделі кінетичного зв'язку. У лінійному режимі еволюції описано генерацію окремих Фур'є-мод калібрувального поля в імпульсному просторі. Запропоновано новий метод для опису генерації калібрувальних полів – формалізм градієнтного розкладу, що дозволяє самоузгоджено врахувати такі нелінійні явища, як зворотна реакція згенерованих полів на інфляційну динаміку та швінґерівське народження пар заряджених частинок. За допомогою цього методу встановлено особливості перебігу

режиму сильної зворотної реакції у моделі кінетичного зв'язку: густина енергії згенерованих полів різко зупиняється у рості і виявляє коливну поведінку, інфляційна фаза подовжується, а поле інфлатон сповільнює своє скочування і плавно зсувається до мінімуму потенціалу. Другий розділ присвячено магнітогенезу в моделі аксіального зв'язку калібрувального поля з інфлатоном. За допомогою формалізму градієнтного розкладу отримано модельно-незалежні оцінки для величини калібрувальних полів, згенерованих у моделі аксіонної інфляції. У режимі сильної зворотної реакції показано, що розв'язок Анбера-Сорбо, в якому втрати енергії під час генерації калібрувального поля забезпечують домінуюче джерело тертя під час скочування інфлатона, не є стійким у жодній області параметрів і початкових умов. Розраховано сучасне значення магнітного поля у войдах, яке може бути згенероване в моделі аксіального зв'язку. У третьому розділі проаналізовано можливості генерації калібрувальних полів у моделях з немінімальним зв'язком з гравітацією. У моделях інфляції Гіґґса та Гіґґса-Старобінського отримано явні вирази для функцій кінетичного і аксіального зв'язку калібрувального поля з інфлатоном в айнштайнівській системі відліку. Описано генерацію калібрувальних полів у лінійному режимі за відсутності зворотної реакції. У модифікованій моделі Старобінського потенційно можуть бути згенеровані калібрувальні поля зі спектром, що є масштабно-інваріантним або навіть має червоний ухил. Однак, зворотна реакція, яка неминуче виникає в цій моделі, сильно змінює поведінку спектру і не дозволяє отримати достатню кореляційну довжину магнітного поля. У четвертому розділі встановлено особливості швінґерівського народження пар заряджених частинок і античастинок у сильних калібрувальних полях під час інфляції. У наближенні, коли струм народжених частинок описується за допомогою узагальненого закону Ома, застосовано формалізм градієнтного розкладу і показано, що ефект Швінґера сильно пригнічує генерацію калібрувальних полів, так що їх зворотна реакція завжди є нехтовною. 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 швінґерівського 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. Зокрема, встановлено, що в гелікальних калібрувальних полях згенерована внаслідок кіральної аномалії асиметрія може становити до 25 % від сумарної концентрації ферміонів. За допомогою кінетичного рівняння Больцмана та формалізму лінійного відгуку розраховано швидкість урівноваження кіральної асиметрії через наявність у частинок ненульової маси. Показано, що темп реакцій з переворотом 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 наївних оцінок. У шостому розділі досліджено генерацію первинних скалярних збурень під час інфляції у присутності калібрувальних полів. Отримано диференціальне рівняння для збурення кривини, яке 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 негаусовості збурень кривини. Отримано загальні вирази для спектрів дво- і триточкової кореляційних функцій первинних збурень.

2. This thesis (scientific report) is devoted to a theoretical study of the generation of Abelian gauge fields at the stage of inflation in the early Universe and various phenomenological aspects of this scenario: the backreaction of the generated fields, the production of charged particles due to the Schwinger effect, the generation of fermionic chiral asymmetry, the formation of primordial scalar perturbations etc. In the first section, we consider the interaction of the gauge field with the inflaton scalar field in the kinetic coupling model. The generation of individual Fourier modes of gauge fields in momentum space is described in the linear evolution regime. We propose a new method for the description of the gauge field generation, the gradient expansion formalism, which allows us to take into account such nonlinear phenomena as the backreaction of the generated fields to inflationary dynamics and the Schwinger production of pairs of charged particles in a self-consistent manner. This method was used to determine the peculiarities of the strong backreaction regime in the kinetic coupling model: The energy density of the generated fields stops growing abruptly and exhibits oscillatory behavior, the

inflationary phase lengthens, and the inflaton field slows down its rolling and smoothly slides to the minimum of its potential. The second section is devoted to magnetogenesis in the model of axial coupling between the gauge field and the inflaton. Using the gradient expansion formalism, we obtain model-independent estimates for the magnitude of gauge fields generated in the axion inflation model. In the strong backreaction regime, it is shown that the Anber-Sorbo solution, in which energy losses due to the gauge field production provide the dominant source of friction during the rolling of the inflaton, is not stable in any region of parameters and initial conditions. We calculate the current value of the magnetic field in voids that can be generated in the axial coupling model. In the third section, we analyze the possibilities of generating gauge fields in models with a nonminimal coupling to gravity. In the Higgs and Higgs-Starobinsky inflation models, explicit expressions for the kinetic and axial coupling functions in the Einstein frame are obtained. The generation of gauge fields in the linear regime in the absence of backreaction is described. The modified Starobinsky model can potentially generate gauge fields with a spectrum that is scale-invariant or even red-tilted. However, the backreaction that inevitably occurs in this model strongly changes the behavior of the spectrum and does not allow for a sufficiently large correlation length of the magnetic field. In the fourth section, we study the peculiarities of the Schwinger pair-production of charged particles and antiparticles in strong gauge fields during inflation. In the approximation where the current of the produced particles is described by the generalized Ohm's law, we apply the gradient expansion formalism and show that the Schwinger effect strongly suppresses the generation of gauge fields, so that their backreaction is always negligible. A system of quantum kinetic equations describing the production of scalar particles by a strong electric field in the early Universe is derived from first principles. Using kinetic and hydrodynamic approaches, the dynamics of Schwinger particle production in a strong electric field is considered and the nonlocal character of the induced current of the produced particles is revealed, which is related to the inertial properties of charge carriers. The fifth section is devoted to the description of the generation and equilibration of the chiral asymmetry of fermions in the early Universe. In particular, it is found that in helical gauge fields the asymmetry generated by the chiral anomaly can be up to 25 % of the total fermion number density. Using the Boltzmann kinetic equation and the linear response formalism, we calculate the rate of equilibration of the chiral asymmetry due to the presence of nonzero particles' mass. It is shown that the rate of reactions with chirality flipping is nonzero already in the first order in the fine structure constant, and therefore its numerical value in the early Universe is about three orders of magnitude larger than expected from naive estimates. In the sixth section, the generation of primordial scalar perturbations during inflation in the presence of gauge fields is studied. A differential equation for the curvature perturbation is derived, which takes into account the influence of the gauge field on both the background dynamics and the evolution of scalar perturbations through the source term which is quadratic in the gauge field operators and leads to non-Gaussianity of the curvature perturbations. The general expressions for the spectra of two- and three-point correlation functions of the primordial perturbations are obtained.

Державний реєстраційний номер ДіР: 0116U002562, 0119U100335, 0122U001957, 0120U105439

Пріоритетний напрям розвитку науки і техніки: Фундаментальні наукові дослідження з найбільш важливих проблем розвитку науково-технічного, соціально-економічного, суспільно-політичного, людського потенціалу для забезпечення конкурентоспроможності України у світі та сталого розвитку суспільства і держави

Стратегічний пріоритетний напрям інноваційної діяльності: Не застосовується

Підсумки дослідження: Теоретичне узагальнення і вирішення важливої наукової проблеми

Публікації:

- S. Vilchinskii, O. Sobol, E. V. Gorbar, I. Rudenok, Magnetogenesis during inflation and preheating in the Starobinsky model, Phys. Rev. D 95, 083509 (11 pages) (2017). DOI: 10.1103/PhysRevD.95.083509
- O.O. Sobol, E.V. Gorbar, M. Kamarpour, S.I. Vilchinskii, Influence of backreaction of electric fields and Schwinger effect on inflationary magnetogenesis, Phys. Rev. D 98, 063534 (19 pages) (2018). DOI:

10.1103/PhysRevD.98.063534

- O.O. Sobol, Electrical conductivity of hot Abelian plasma with scalar charge carriers, Phys. Rev. D 100, 056012 (18 pages) (2019). DOI: 10.1103/PhysRevD.100.056012
- O.O. Sobol, E.V. Gorbar, S.I. Vilchinskii, Backreaction of electromagnetic fields and the Schwinger effect in pseudoscalar inflation magnetogenesis, Phys. Rev. D 100, 063523 (21 pages) (2019). DOI: 10.1103/PhysRevD.100.063523
- E.V. Gorbar, A.I. Momot, O.O. Sobol, S.I. Vilchinskii, Kinetic approach to the Schwinger effect during inflation, Phys. Rev. D 100, 123502 (15 pages) (2019). DOI: 10.1103/PhysRevD.100.123502
- O.O. Sobol, E.V. Gorbar, A.I. Momot, S.I. Vilchinskii, Schwinger production of scalar particles during and after inflation from the first principles, Phys. Rev. D 102, 023506 (20 pages) (2020). DOI: 10.1103/PhysRevD.102.023506
- O.O. Sobol, A.V. Lysenko, E.V. Gorbar, S.I. Vilchinskii, Gradient expansion formalism for magnetogenesis in the kinetic coupling model, Phys. Rev. D 102, 123512 (20 pages) (2020). DOI: 10.1103/PhysRevD.102.123512
- A. Boyarsky, V. Cheianov, O. Ruchayskiy, O. Sobol, Equilibration of the chiral asymmetry due to finite electron mass in electron-positron plasma, Phys. Rev. D 103, 013003 (39 pages) (2021). DOI: 10.1103/PhysRevD.103.013003
- A. Boyarsky, V. Cheianov, O. Ruchayskiy, O. Sobol, Evolution of the Primordial Axial Charge across Cosmic Times, Phys. Rev. Lett. 126, 021801 (6 pages) (2021). DOI: 10.1103/PhysRevLett.126.021801
- O.O. Sobol, E.V. Gorbar, O.M. Teslyk, S.I. Vilchinskii, Generation of an electromagnetic field nonminimally coupled to gravity during Higgs inflation, Phys. Rev. D 104, 043509 (20 pages) (2021). DOI: 10.1103/PhysRevD.104.043509
- E.V. Gorbar, K. Schmitz, O.O. Sobol, S.I. Vilchinskii, Gauge-field production during axion inflation in the gradient expansion formalism, Phys. Rev. D 104, 123504 (22 pages) (2021). DOI: 10.1103/PhysRevD.104.123504
- E.V. Gorbar, K. Schmitz, O.O. Sobol, S.I. Vilchinskii, Hypermagnetogenesis from axion inflation: Model-independent estimates, Phys. Rev. D 105, 043530 (20 pages) (2022). DOI: 10.1103/PhysRevD.105.043530
- R. Durrer, O. Sobol, and S. Vilchinskii, Magnetogenesis in Higgs-Starobinsky inflation, Phys. Rev. D 106, 123520 (21 pages) (2022). DOI: 10.1103/PhysRevD.106.123520
- R. Durrer, O. Sobol, and S. Vilchinskii, Backreaction from gauge fields produced during inflation, Phys. Rev. D 108, 043540 (26 pages) (2023). DOI: 10.1103/PhysRevD.108.043540
- E.V. Gorbar, A.I. Momot, I.V. Rudenok, O.O. Sobol, S.I. Vilchinskii, and I.V. Oleinikova, Chirality production during axion inflation, Ukr. J. Phys. 68, 717–729 (2023). DOI: 10.15407/ujpe68.11.717
- R. von Eckardstein, M. Peloso, K. Schmitz, O. Sobol, and L. Sorbo, Axion inflation in the strong-backreaction regime: decay of the Anber-Sorbo solution, J. High Energy Phys. 11, 183 (42 pages) (2023). DOI: 10.1007/JHEP11(2023)183
- R. Durrer, R. von Eckardstein, D. Garg, K. Schmitz, O. Sobol, and S. Vilchinskii, Scalar perturbations from inflation in the presence of gauge fields, Phys. Rev. D 110, 043533 (36 pages) (2024). DOI: 10.1103/PhysRevD.110.043533
- R. von Eckardstein, K. Schmitz, and O. Sobol, On the Schwinger effect during axion inflation, J. High Energy Phys. 02, 096 (40 pages) (2025). DOI: 10.1007/JHEP02(2025)096

Наукова (науково-технічна) продукція: методи, теорії, гіпотези

Соціально-економічна спрямованість:

Охоронні документи на ОПІВ:

Впровадження результатів дисертації: Впроваджено

Зв'язок з науковими темами: 0116U002562, 0119U100335, 0122U001957, 0120U105439

VI. Відомості про наукового керівника/керівників (консультанта)

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Вільчинський Станіслав Йосипович
2. Stanislav I. Vilchinskii

Кваліфікація: д.ф.-м.н., професор, 01.04.02

Ідентифікатор ORCID ID: 0000-0002-9294-9939

Додаткова інформація: Scopus Author ID: 56962724900

Повне найменування юридичної особи: Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Код за ЄДРПОУ: 02070944

Місцезнаходження: вул. Володимирська, буд. 60, Київ, 01033, Україна

Форма власності:

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR: Не застосовується

VII. Відомості про офіційних опонентів та рецензентів

Офіційні опоненти

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Слюсаренко Юрій Вікторович
2. Yurii V. Slyusarenko

Кваліфікація: д.ф.-м.н., професор, академік НАН України, 01.04.02

Ідентифікатор ORCID ID: 0000-0001-5298-0731

Додаткова інформація: ResearcherID: E-5012-2018

Повне найменування юридичної особи: Інститут теоретичної фізики ім. О.І.Ахієзера Національного наукового центру "Харківський фізико-технічний інститут"

Код за ЄДРПОУ: 24278254

Місцезнаходження: вул. Академічна, 1, Харків, Харківський р-н., 61108, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Національна академія наук України

Ідентифікатор ROR:

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Новосядлий Богдан Степанович
2. Bohdan S. Novosyadlyj

Кваліфікація: д.ф.-м.н., член-кор. НАН України, професор, 01.03.02

Ідентифікатор ORCID ID: 0000-0003-1621-0873

Додаткова інформація: Scopus Author ID: 14058507400; ResearcherID: L-5225-2017

Повне найменування юридичної особи: Львівський національний університет імені Івана Франка

Код за ЄДРПОУ: 02070987

Місцезнаходження: вул. Університетська, буд. 1, Львів, 79000, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR:

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Штанов Юрій Володимирович
2. Yurii V. Shtanov

Кваліфікація: д. ф.-м. н., старший науковий співробітник, 01.04.02

Ідентифікатор ORCID ID: 0000-0002-4891-7059

Додаткова інформація: Scopus Author ID: 6602150040

Повне найменування юридичної особи: Інститут теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова Національної академії наук України

Код за ЄДРПОУ: 05417124

Місцезнаходження: вул. Метрологічна, буд. 14-б, Київ, 03143, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Національна академія наук України

Ідентифікатор ROR:

Рецензенти

VIII. Заключні відомості

Власне Прізвище Ім'я По-батькові голови ради	Лев Богдан Іванович
Власне Прізвище Ім'я По-батькові головуючого на засіданні	Лев Богдан Іванович
Відповідальний за підготовку облікових документів	Вчений секретар спецради Ярослав ЗОЛОТАРЮК
Реєстратор	УкрІНТЕІ

Керівник відділу УкрІНТЕІ, що є відповідальним за реєстрацію наукової діяльності

Юрченко Тетяна Анатоліївна